Rapporter och meddelanden 147

Helikopterburna TEM-mätningar i Halland – Geologiska tolkningar och hydrogeologisk tillämpning

Peter Dahlqvist, Cecilia Brolin, Eva Hellstrand, Mikael Erlström, Mattias Gustafsson, Kärstin Malmberg Persson Mats Engdahl, Lars-Ove Lång & Jenny Andersson





Rapporter och meddelanden 147

Helikopterburna TEM-mätningar i Halland – Geologiska tolkningar och hydrogeologisk tillämpning

Peter Dahlqvist, Cecilia Brolin, Eva Hellstrand, Mikael Erlström, Mattias Gustafsson, Kärstin Malmberg Persson, Mats Engdahl, Lars-Ove Lång & Jenny Andersson

Sveriges geologiska undersökning 2019

ISSN 0349-2176 ISBN 978-91-7403-460-8

Ändring genomförd 5 november 2020

Sidan 83. Komplettering av referens:

Christiansen, A.V., Auken, E. & Sørensen, K., 2009: The transient electromagnetic method. In: Kirsch R. (eds) Groundwater Geophysics. Springer, Berlin, Heidelberg.

Omslagsbild: Foto på helikopter med SkyTEM-systemet.

Fotograf: Peter Dahlqvist

Författare: Peter Dahlqvist, Peter Dahlqvist, Cecilia Brolin, Eva Hellstrand, Mikael Erlström, Mattias Gustafsson, Kärstin Malmberg Persson, Mats Engdahl, Lars-Ove Lång & Jenny Andersson **Ansvarig enhetschef:** Jakob Levén

Layout: Marika Håkanson

Sveriges geologiska undersökning Box 670, 751 28 Uppsala tel: 018-17 90 00 fax: 018-17 92 10 e-post: sgu@sgu.se www.sgu.se

INNEHÅLL

Sammanfattning	
Abstract	6
Termer	
Inledning Undersökningsområden	
Mål och syfte	
Genomförda undersökningar och underlagsdata SkyTEM Geofysiska markmätningar Brunnsarkiv och borrningar	
Bearbetning och dataanalys 3D-modeller Resistivitetsmodeller Analys av resistivitetsfördelning Lagermodell	
Laholm Geologisk beskrivning Resultat och områdesspecifika tolkningar	
Falkenberg Geologisk beskrivning Resultat och områdesspecifika tolkningar	
Slutsatser och diskussion Hydrogeolgisk tolkning Rekommendationer för vidare arbeten avseende vattenförsörjning Mätmetodens begränsningar och möjligheter 3D-modellering Vidare arbete med data	
Referenser	
Bilaga 1. Intressanta områden i Laholm	
Bilaga 2. Intressanta områden i Falkenberg	
Bilaga 3. Redovisning av tTEM resultat	

SAMMANFATTNING

Sveriges geologiska undersökning (SGU) undersökte 2017 två områden i Halland med helikopterburen transient elektromagnetisk mätning (ATEM – Airborne Transient Electromagnetic). Ett undersökningsområde är lokaliserat i Laholms och Båstads kommuner och det andra inom Falkenbergs kommun. Syftet med undersökningarna var att bidra med ny information kring de hydrogeologiska förhållandena för att skapa ett förbättrat underlag vid planering av både enskild och kommunal vattenförsörjning. En målsättning var att om möjligt ringa in intressanta områden för att effektivisera var man bör prioritera ytterligare grundvattenundersökningar.

Båda undersökningsområdena ligger till största delen under högsta kustlinjen (HK) och har mäktiga jordlager. Berggrunden består främst av gnejs förutom i sydvästra delen av Laholms undersökningsområde, intill Hallandsåsens förkastning, där gnejsen överlagras av sedimentär berggrund (kritberggrund). Den generella jordlagerföljden i båda områden liknar varandra; underst finns ofta ett lager med morän alternativt sand och grus, sedan ett mäktigt lerlager och i ytan oftast sand. Större grundvattentillgångar förekommer i sand- och grusavlagringar i både öppna och slutna akviferer samt i sprick- och porakviferer i berggrunden.

ATEM-mätningarna har utförts med mätsystemet SkyTEM och genomförts av företaget med samma namn. Flygningarna utfördes så att mätinstrumentet befann sig mellan 30 och 50 meter ovan markytan längs parallella flyglinjer med ca 200 meters mellanrum. Under totalt fem dagar i oktober 2017 undersöktes ett område på 234 km² i Laholms och Båstads kommun samt ett område på 83 km² i Falkenbergs kommun. Metoden ger en modell av markens elektriska ledningsförmåga utryckt som resistivitet. Geologiska material har olika resistivitet beroende på mineralsammansättning, porositet och vattenmättnadsgrad. Det går därmed att särskilja olika geologiska enheter från varandra och tolka mätresultaten till geologisk information med hjälp av lagerföljdsinformation från borrningar och annan tillgänglig underlagsinformation. I denna rapport beskrivs bearbetning och analys av mätresultat samt en inledande geologisk och hydrogeologisk tolkning av dessa.

I båda undersökningsområdena har ett antal områden pekats ut som intressanta ur ett hydrogeologiskt perspektiv, både avseende infiltrationsförutsättningar och uttagsmöjligheter. SGU föreslår att dessa områden utreds vidare för att klarlägga de hydrogeologiska förhållandena i mer detalj. En ny jorddjupsmodell har tagits fram i båda undersökningsområdena baserat på data från de nya mätningarna.

I Laholms undersökningsområde utfördes uppföljande borrningar efter tolkning av insamlad geofysiska data. I ett identifierat intressant område vid Årnaberga erhölls en betydande vattenmängd vid borrning. En kärnborrning genomfördes också genom kritberggrunden vid Skummeslövsstrand där även geofysisk borrhålsloggning utfördes. Undersökningen indikerar god vattenföring i översta delen av berget, en identifierad saltvattennivå samt gav betydande ny geologisk information om kritberggrunden.

I Falkenberg har utbredning och geometri för de mäktiga lerlagren i centrala delarna av Ätrans dalgång kunnat karteras med god säkerhet. Intressanta områden i ett vattenförsörjningsperspektiv har identifierats, framför allt omkring Heberg. Tolkning av bergöverytan visar på mycket större underjordisk topografisk variation än vad som tidigare antagits.

Undersökningsresultaten visar att ATEM-metodiken lämpar sig väl för en karaktärisering av jordlagren i undersökningsområdena. Problem uppstår däremot vid mätningar över hällar, tunna jordlager och vid mycket mäktiga (över cirka 30 meter) lerlager – områden där metoden fungerar sämre. Undersökningen har resulterat i att en stor mängd data har samlats in som kan användas för vidare arbete och framställande av geologiska 3D-modeller.

ABSTRACT

The geological survey of Sweden (SGU) surveyed two areas in the Halland and Scania county with helicopterborne transient electromagnetic measurements (ATEM – Airborne Transient Electromagnetic) in 2017. One investigation area was in Laholm and Båstad municipalities and the other was in Falkenberg municipality. The purpose of the surveys is to improve the basis for planning the water supply in the region by provide new and detailed information about the geological and hydrogeological conditions. One subjective is to identify interesting areas to make future hydrogeological investigations more efficient.

Both survey areas are mostly located below the highest shoreline and has powerful soil thickness. The underlying bedrock mainly consists of gneiss but in the southwestern part of Laholm exploration area, adjacent to the Hallandsås fault, the gneiss is overlain by sedimentary rocks. The general sequence in the soil layer in both areas is alike; directly on top of the bedrock there is often a layer of till or sand and gravel, above this a thick layer of clay and at the surface usually sand. Large groundwater resources occur in the areas of sand and gravel deposits in both open and closed aquifers and in fractures and pore aquifers in the bedrock.

The ATEM surveys have been made by the company SkyTEM. The surveys were carried out with the instrument located between 30 and 50 meters above the ground and along parallel routes approximately 200 meters apart. For a total of five days in October 2017, an area of 234 km² was surveyed in Laholm–Båstad and an area of 83 km² in Falkenberg.

The method provides a model of the ground's electrical conductivity expressed as resistivity. Geological materials have different resistivity depending on mineral composition, porosity and water saturation. It is thus possible to distinguish different geological units from each other and interpret the resistivity to geological information. Additional aid for interpretation comes from drillings and other available geophysical ground surveys. This report describes processing and analysis of data together with a geological and hydrogeological interpretation.

In both survey areas, several smaller areas have been identified as interesting from a hydrogeological perspective, both regarding infiltration conditions and location of possible aquifers. These areas are proposed to be further investigated to clarify the hydrogeological conditions in more detail. A new soil depth model has been defined in both study areas.

In the Laholm survey area, follow-up drilling was performed after interpretation of collected geophysical data. In an identified interesting area at Årnaberga, considerable water was obtained during drilling. A core drilling at Skummeslövsstrand, was carried out through the sedimentary bedrock where geophysical borehole logging was also performed. The drilling indicates good water flow in the top part of the bedrock, a salt water level was identified and significant new geological information about the sedimentary bedrock was obtained.

In Falkenberg, the distribution and geometry of the thick clay layers in the central parts of Ätran valley have been mapped with good accuracy. Interesting areas regarding groundwater supply have been identified, especially around Heberg. The interpretation of the bedrock surface shows much greater topographical variation in the bedrock surface compared to what was previously known.

The survey results show that the ATEM methodology is well suited for a characterization of the soil layers in the survey areas. Problems, on the other hand, arise during measurements over areas with no or very thin soil cover and with very thick (over 30 meters) clay layers. The survey has resulted in a large amount of data being collected which can be used for further work and production of geological 3D models.

TERMER

Akvifer	En vattenförande formation i jord eller berg som kan avge vatten i användbara volymer.
ATEM	Airborne Transient Electromagnetic. Luftburen TEM-metod.
Brunnsarkivet	SGUs brunnsarkiv som tar emot och lagrar information om brunnar enligt lagen om uppgifts- skyldighet (SFS 1975:424).
ERT	Elektrisk resistivitetstomografi. Kallas även resistivitetsmätning. En direkt mätning av poten- tialskillnad mellan elektroder i marken genom utsändande av ström.
Extramarginalt delta	Ett isälvsdelta avsatt på stort avstånd från inlandsisens kant, i hav eller issjö. Deltat är avsatt ovanpå lera.
Fönster	Sand- och grusavlagringar med stor mäktighet som saknar täta lerlager som annars finns i närområdet. Området kan därmed utgöra ett infiltrations- och nybildningsområde.
Geofysisk sondering	En fiktiv borrning som istället för att bestå av en lagerföljd visar hur en fysikalisk parameter (till exempel resistivitet) varierar med djupet i en punkt.
GIS	Geografiska informationssystem. GIS är datorbaserade informationssystem för inmatning, bearbetning, lagring, analys och presentation av geografiska data.
Grid	Ett rutnät. För att visualisera data interpoleras datapunkter till en sammanhängande yta, som är uppbyggd av ett rutnät/pixlar (2D) eller kuber/voxlar (3D) med en bestämd dimen- sion.
Inversionsteknik	Modellering genom att anpassa modellparametrar till observerad data. För ATEM-mätningar innebär det att en resistivitetsfördelning ansätts (en startmodell) som anpassas till uppmät- ta data som består av avklingningskurvor av det sekundära magnetfältet.
Konduktivitet	Ett materials förmåga att leda elektrisk ström.
Lineament	En linjär struktur observerad i någon typ av data, oftast geofysisk, som representerar en geologisk struktur.
Lineament Litologi	En linjär struktur observerad i någon typ av data, oftast geofysisk, som representerar en geologisk struktur. Beskrivning av jord- eller bergart beroende på kornstorlek och mineralsammansättning.
Lineament Litologi Paleogeografi	En linjär struktur observerad i någon typ av data, oftast geofysisk, som representerar en geologisk struktur. Beskrivning av jord- eller bergart beroende på kornstorlek och mineralsammansättning. Beskrivning av historisk geografi.
Lineament Litologi Paleogeografi Randdelta	En linjär struktur observerad i någon typ av data, oftast geofysisk, som representerar en geologisk struktur. Beskrivning av jord- eller bergart beroende på kornstorlek och mineralsammansättning. Beskrivning av historisk geografi. Isälvsdelta vid inlandsisens kant, i hav eller issjö. Underlagras inte av lera.
Litologi Paleogeografi Randdelta Resistivitet	En linjär struktur observerad i någon typ av data, oftast geofysisk, som representerar en geologisk struktur. Beskrivning av jord- eller bergart beroende på kornstorlek och mineralsammansättning. Beskrivning av historisk geografi. Isälvsdelta vid inlandsisens kant, i hav eller issjö. Underlagras inte av lera. Ett materials motstånd till att leda elektrisk ström.
Litologi Paleogeografi Randdelta Resistivitet Resistivitetsmodeller	En linjär struktur observerad i någon typ av data, oftast geofysisk, som representerar en geologisk struktur. Beskrivning av jord- eller bergart beroende på kornstorlek och mineralsammansättning. Beskrivning av historisk geografi. Isälvsdelta vid inlandsisens kant, i hav eller issjö. Underlagras inte av lera. Ett materials motstånd till att leda elektrisk ström. Inversionsresultat av data från TEM-mätningar.
Lineament Litologi Paleogeografi Randdelta Resistivitet Resistivitetsmodeller Skruvborrning	En linjär struktur observerad i någon typ av data, oftast geofysisk, som representerar en geologisk struktur. Beskrivning av jord- eller bergart beroende på kornstorlek och mineralsammansättning. Beskrivning av historisk geografi. Isälvsdelta vid inlandsisens kant, i hav eller issjö. Underlagras inte av lera. Ett materials motstånd till att leda elektrisk ström. Inversionsresultat av data från TEM-mätningar. En jordskruv roteras ner genom jordlagren med en borrbandvagn. Skruven tas upp och be- dömning av jordart samt eventuell provtagning görs i fält.
Lineament Litologi Paleogeografi Randdelta Resistivitet Resistivitetsmodeller Skruvborrning SkyTEM	 En linjär struktur observerad i någon typ av data, oftast geofysisk, som representerar en geologisk struktur. Beskrivning av jord- eller bergart beroende på kornstorlek och mineralsammansättning. Beskrivning av historisk geografi. Isälvsdelta vid inlandsisens kant, i hav eller issjö. Underlagras inte av lera. Ett materials motstånd till att leda elektrisk ström. Inversionsresultat av data från TEM-mätningar. En jordskruv roteras ner genom jordlagren med en borrbandvagn. Skruven tas upp och bedömning av jordart samt eventuell provtagning görs i fält. Helikopterburen TEM-metod anpassad för hydrogeologiska tillämpningar. SkyTEM är också namnet på det företag som utför mätningarna.
Lineament Litologi Paleogeografi Randdelta Resistivitet Resistivitetsmodeller Skruvborrning SkyTEM Sondering	 En linjär struktur observerad i någon typ av data, oftast geofysisk, som representerar en geologisk struktur. Beskrivning av jord- eller bergart beroende på kornstorlek och mineralsammansättning. Beskrivning av historisk geografi. Isälvsdelta vid inlandsisens kant, i hav eller issjö. Underlagras inte av lera. Ett materials motstånd till att leda elektrisk ström. Inversionsresultat av data från TEM-mätningar. En jordskruv roteras ner genom jordlagren med en borrbandvagn. Skruven tas upp och bedömning av jordart samt eventuell provtagning görs i fält. Helikopterburen TEM-metod anpassad för hydrogeologiska tillämpningar. SkyTEM är också namnet på det företag som utför mätningarna. En spets trycks, vrids eller slås ner genom jordlagren med en borrbandvagn. Motståndet mot neddrivningen registreras och tolkas till jordart.
Lineament Litologi Paleogeografi Randdelta Resistivitet Resistivitetsmodeller Skruvborrning SkyTEM Sondering TEM	En linjär struktur observerad i någon typ av data, oftast geofysisk, som representerar en geologisk struktur. Beskrivning av jord- eller bergart beroende på kornstorlek och mineralsammansättning. Beskrivning av historisk geografi. Isälvsdelta vid inlandsisens kant, i hav eller issjö. Underlagras inte av lera. Ett materials motstånd till att leda elektrisk ström. Inversionsresultat av data från TEM-mätningar. En jordskruv roteras ner genom jordlagren med en borrbandvagn. Skruven tas upp och be- dömning av jordart samt eventuell provtagning görs i fält. Helikopterburen TEM-metod anpassad för hydrogeologiska tillämpningar. SkyTEM är också namnet på det företag som utför mätningarna. En spets trycks, vrids eller slås ner genom jordlagren med en borrbandvagn. Motståndet mot neddrivningen registreras och tolkas till jordart. Transient Electromagnetic, en tidsdomän elektromagnetisk geofysisk mätmetod.
Lineament Litologi Paleogeografi Randdelta Resistivitet Resistivitetsmodeller Skruvborrning SkyTEM Sondering TEM tTEM	En linjär struktur observerad i någon typ av data, oftast geofysisk, som representerar en geologisk struktur. Beskrivning av jord- eller bergart beroende på kornstorlek och mineralsammansättning. Beskrivning av historisk geografi. Isälvsdelta vid inlandsisens kant, i hav eller issjö. Underlagras inte av lera. Ett materials motstånd till att leda elektrisk ström. Inversionsresultat av data från TEM-mätningar. En jordskruv roteras ner genom jordlagren med en borrbandvagn. Skruven tas upp och be- dömning av jordart samt eventuell provtagning görs i fält. Helikopterburen TEM-metod anpassad för hydrogeologiska tillämpningar. SkyTEM är också namnet på det företag som utför mätningarna. En spets trycks, vrids eller slås ner genom jordlagren med en borrbandvagn. Motståndet mot neddrivningen registreras och tolkas till jordart. Transient Electromagnetic, en tidsdomän elektromagnetisk geofysisk mätmetod. towed Transient electromagnetic. En TEM-mätning som utförs genom att en sändare och mottagare dras på en släde efter en fyrhjuling.
Lineament Litologi Paleogeografi Randdelta Resistivitet Resistivitetsmodeller Skruvborrning SkyTEM Sondering TEM TEM VLF	 En linjär struktur observerad i någon typ av data, oftast geofysisk, som representerar en geologisk struktur. Beskrivning av jord- eller bergart beroende på kornstorlek och mineralsammansättning. Beskrivning av historisk geografi. Isälvsdelta vid inlandsisens kant, i hav eller issjö. Underlagras inte av lera. Ett materials motstånd till att leda elektrisk ström. Inversionsresultat av data från TEM-mätningar. En jordskruv roteras ner genom jordlagren med en borrbandvagn. Skruven tas upp och bedömning av jordart samt eventuell provtagning görs i fält. Helikopterburen TEM-metod anpassad för hydrogeologiska tillämpningar. SkyTEM är också namnet på det företag som utför mätningarna. En spets trycks, vrids eller slås ner genom jordlagren med en borrbandvagn. Motståndet mot neddrivningen registreras och tolkas till jordart. Transient Electromagnetic, en tidsdomän elektromagnetisk geofysisk mätmetod. towed Transient electromagnetic. En TEM-mätning som utförs genom att en sändare och mottagare dras på en släde efter en fyrhjuling. Very Low Frequency. En elektromagnetisk mätmetod som utnyttjar radiosändare i frekvensbandet 10–30 kHz.

INLEDNING

Under 2016–2017 var både den kommunala och enskilda vattenförsörjningen i Halland hårt ansträngd. Bevattningsförbud rådde under stora delar av året. Länsstyrelsen Halland och ett flertal kommuner var i kontakt med Sveriges geologiska undersökning (SGU) angående låga grundvattennivåer och problem kopplade till detta. SGU gjorde bedömningen att det i områden runt Laholm och Falkenberg fanns förutsättningar att undersöka grundvattenförekomster med helikopterburen transient elektromagnetisk mätning (ATEM). Erfarenheter från undersökningar på Gotland och Öland med denna teknik visar att mätningarna ger detaljerad information om geologiska förhållanden i jordlagren och berggrunden som kan kopplas till hydrogeologiska förutsättningar och bedömning av förekomst av grundvattenmagasin (Dahlqvist m.fl. 2015, 2017, 2018).

Metoden är kostnadseffektiv då mycket information kan samlas in över stora områden under en kort tid. Den tredimensionalitet man får med metoden utgör ett mycket bra tolkningsunderlag. Under oktober 2017 utfördes mätningar av det danska företaget SkyTEM inom två områden i Halland, Laholm och Falkenberg (fig. 1). Mätningarna med ATEM i Halland är de första i Sverige som är utförda med grundvattenfokus där mätområdet till största del består av mäktiga jordlager som underlagras av urberg (icke sedimentärt berg). Undersökningarna utgör därför även ett test av metoden i denna typ av geologisk miljö.

Resultatet från mätningarna blir resistivitetsmodeller med ca 30 meters mellanrum längs helikopterns flyglinjer. Resistivitetsvariationer beror främst på skillnader i andel lermineral, porositet och vattenmättnadsgrad. I samtolkning med geologiska konceptuella modeller och annan data (främst lagerföljder från borrhålsinformation) kan resistiviteten tolkas till geologi och i sin tur till hydrogeologiska förutsättningar.

Insamling av nya data syftar till att bidra med underlag till fortsatta undersökningar och att öka kunskapen om de hydrogeologiska förutsättningarna i undersökningsområdena. Målet med undersökningen var att identifiera intressanta områden ur ett hydrogeologiskt perspektiv. Vidare målsättningar med mätningarna är att informationen ska kunna användas som geologiskt bedömningsunderlag.

Denna rapport vänder sig till alla som arbetar med vattenfrågor inom eller i anslutning till undersökningsområdena. Detta innefattar berörda kommuner och länsstyrelser samt förmodade framtida direkta användare av data såsom exempelvis konsulter. Avsnittet *Bearbetning och dataanalys* vänder sig främst till framtida användare av data. Resultatdelen med ingående redovisningar av hydrogeologiskt intressanta områden visar exempel på hur data kan användas. I bilaga 1 och 2 redovisas fler utpekade områden med en kort beskrivning.

Denna rapport utgör inte en fullständig redovisning av all data utan redogör för hur data har bearbetats och tolkats i delar av undersökningsområdena med ett hydrogeologiskt perspektiv. Mer information finns att hämta ur insamlade data och SGUs målsättning är att det ska komma samhället till nytta genom externa intressenter samt genom vidare användning inom myndigheten.

Undersökningsområden

Undersökningen skedde 2017 i två områden i Halland och delvis i Skåne, ett i Laholms och Båstads kommuner och ett i Falkenbergs kommun (fig. 1). Undersökningsområdet i Laholms och Båstads kommuner karakteriseras av ett slättlandskap med höjdområden i öster och Hallandsåsen som gräns mot söder. Jordlagerföljden består i allmänhet av ett övre sandlager eller ett sand- och gruslager vars mäktighet varierar stort. Under detta förekommer oftast ett mäktigt lerlager längst ut vid kusten, vars mäktighet minskar österut. Under leran förekommer antigen ett sand- och gruslager eller ett tunt lager av morän. De huvudsakliga grundvattentillgångarna finns i dessa undre sand- och grusavlagringar. Berggrunden i området domineras av gnejs men i den sydvästra delen av området överlagras gnejsen av sedimentär berggrund som också utgör ett grundvattenmagasin. Även större sprickzoner i gnejsen har potential att utgöra grundvattenmagasin.

Undersökningsområdet i Falkenbergs kommun (fig. 1) karakteriseras av en kuperad topografi och är koncentrerat kring Ätrans dalgång. I området finns många berghällar omgivna av stora jorddjup som vittnar om en kraftigt kuperad topografi även för berggrunden under jordlagren. Det är vanligt förekommande med ytliga sand- och gruslager som överlagrar ett lerlager med en betydande mäktighet. Det mäktiga lerlagret underlagras ibland av sand- och gruslager och ibland av morän. Jordlagerföljderna liknar således varandra i de två undersökningsområdena. Huvudsakliga grundvattenmagasin i jordlagren finns i mäktiga sand- och grusavlagringar i de norra delarna och i utkanten av området samt i slutna magasin under mäktiga lerlager i mitten på dalgångarna. Berggrunden i Falkenberg består av gnejs och möjliga grundvattenmagasin i berggrunden består av större sprickzoner.



Figur 1. Orienteringskarta och undersökningsområdena Laholm och Falkenberg.

MÅL OCH SYFTE

Syftet med undersökningarna i Halland är att öka kunskapen om de hydrogeologiska förhållandena och identifiera områden där det kan finnas goda förutsättningar för grundvattenuttag samt möjliga infiltrationsområden. Målsättningen med undersökningen har varit att den skulle ge:

- kunskap om jordlagrens uppbyggnad i tre dimensioner
- en ny förbättrad modell för bergöverytans läge (ger en förbättrad jorddjupsmodell)
- underlag för att skapa geologiska 3D–modeller.

Den övergripande målsättningen är att de nya kunskaperna och den insamlade informationen ska kunna användas som geologiskt bedömningsunderlag av Laholms, Båstads samt Falkenbergs kommuner, Länsstyrelsen Halland och Länsstyrelsen Skåne, Vattenmyndigheten i Västerhavet, konsulter och mark- och miljödomstolen i samband med frågor som berör ett flertal områden (fig. 2):

- planering av kommunal dricksvattenförsörjning
- vattenskyddsområden, bland annat utformning och tillsyn
- planering och tillsyn av brunnar för enskild vattenförsörjning och enskilda avlopp
- vattenförvaltningsarbete
- vattenförsörjningsplaner
- planering och tillsyn av anläggningar för geoenergi.

SGU har även ett långsiktigt syfte att utvärdera hur undersökningsmetodiken kan användas för att öka kunskapen om jordlagrens och berggrundens uppbyggnad samt grundvattnets förekomst i fler delar av Sverige. I första hand gäller det områden med sedimentär berggrund, men mätningar i detta



Figur 2. Basen för en hänsynsfull samhällsplanering är ett tillförlitligt geologiskt underlag. Underlaget krävs för en långsiktigt hållbar användning, för bevarande och skyddande av viktiga vattenresurser. Figuren omgjord från figur 1, SGU 2009:24.

projekt ska också utvärdera möjligheten att använda metoden i områden med urberg. I dagsläget koncentreras insatserna till områden som på grund av klimatförändringar eller annan anledning har problem med tillgång på grundvatten för dricksvattenförsörjningen.

GENOMFÖRDA UNDERSÖKNINGAR OCH UNDERLAGSDATA

SkyTEM

SkyTEM är benämningen på det helikopterburna mätsystem som är utvecklat vid Århus universitet i Danmark. SkyTEM är också namnet på det företag som utför mätningar med detta system. ATEM står för Airborne Transient Electromagnetic och är den allmänna termen för metoden att undersöka markens resistivitetsfördelning på djupet genom mätning från ett luftburet system. TEM är en induktionsmetod vilken innebär att en elektrisk ström uppstår (induceras) genom en variation i ett magnetfält. SkyTEMs mätteknik är anpassad för hydrogeologisk kartering med avseende på upplösning och djupkänning. Genom att den är luftburen är det en effektiv metod för att kartera stora områden. Beskrivning av metodiken för SkyTEM-systemet presenteras kortfattat nedan, för en mer komplett beskrivning se Sørensen & Auken (2004) eller Christiansen m.fl. (2009).

En spole, bestående av en kabelslinga, monteras i en ram som hängs under helikoptern (fig. 3). En kraftig ström skickas ut i spolen och strömmen slås sedan av momentant vilket ger upphov till ett



Långt efter strömavslag

Figur 3. Grundprincipen för mätsystemet och strömutbredning i marken. Dimensionen för ramen är ca 30 × 15 m.

magnetfält. Responsen på detta magnetfält i omgivande material ger upphov till ett sekundärt inducerat elektriskt och magnetiskt fält. Förändringen i det sekundära magnetiska fältet mäts i en mottagarspole som också hänger under helikoptern (fig. 3). Styrkan på fältet och hur snabbt det avklingar beror på primärfältets styrka, markens elektriska ledningsförmåga (konduktivitet), flyghöjd och förekomsten av olika störningar (kablar, rör, elektriska ledningar). Resultatet från mätningarna presenteras oftast som elektrisk resistivitet och anges i enheten Ohm-meter (Ohmm).

Under mätningarna i Halland flög helikoptern så att metallramen för mätsystemet befann sig mellan 30 och 50 meter över markytan. Samtidig registrering sker av signalen i mottagarspolen, helikopterns geografiska position, sändarramens läge och lutning, strömstyrka i sändarkabeln och flyghöjd över marken. Flygningen utfördes längs parallella linjer med ca 200 meters avstånd. Anpassningar sker både i position och i höjdled för att undvika störningar i mätningarna och av säkerhetsskäl. Avvikande flygriktning och höjd sker vid tät bebyggelse, kraftledningar, järnvägar och annan infrastruktur samt över områden med tamdjur som kan bli skrämda av en lågt flygande helikopter med hängande last.

Flyglinjer inom Laholms och Falkenbergs undersökningsområden redovisas i figur 4. Totalt flögs 1 173 linjekilometer i Laholm och 415 linjekilometer i Falkenberg under sammanlagt 5 dagar i oktober 2017. Insamlade data har kvalitetsgranskats, processerats och inverterats i programvaran Aarhus Workbench (Aarhus GeoSoftware). Data från helikoptermätningen består av mätningar med ca 30 meters mellanrum längs flyglinjen och varje mätning är en så kallad TEM-sondering eller avklingningskurva av magnetfältet (fig. 5).

Innan vidare arbete med mätdata måste all rådata kvalitetsgranskas och störda data rensas bort. Störda data är till exempel data som är påverkade av elektriska installationer eller stängsel. Denna genomgång sker både genom en automatiserad och en manuell process. Genomgången är tidskrä-



Figur 4. Karta över undersökningsområdena med lokalisering av flyglinjer längs vilka det har samlats in ATEM-data. För Laholms undersökningsområde visas också övriga geofysiska markmätningar som finns här. För Falkenberg finns inga markgeofysiska undersökningar i SGUs databas.

vande men av yttersta vikt för att endast få kvar och använda data som representerar geologi i det fortsatta arbetet.

Efter inledande datarensning skapas resistivitetsmodeller (fig. 5 och 8) genom så kallad inversion. Inversion innebär att man ansätter en modell och beräknar vilken respons denna modell skulle ge upphov till (i detta fall en avklingningskurva av magnetfältet). Den beräknade och uppmätta responsen jämförs och modellen ändras i en iterativ process till dess att beräknad och uppmätt data är tillräckligt nära varandra. Den använda modellen antar att marken är uppbyggd av 30 lager med ökande mäktighet på djupet (fig. 8). Modellen antar att resistiviteten enbart varierar med djupet – modellen är på så vis att betrakta som endimensionell. Inversionen anpassas så att det är mjuka övergångar för resistivitetsvärdena i både vertikal- och horisontalled. Den vertikala anpassningen kallas "smooth inversion" och är en generell metod som passar bra för de flesta geologiska miljöer. Den horisontella anpassningsmetodiken kallas "spatially constrained inversion" (SCI) (Viezzoli m. fl. 2008). Resultatet blir en kvasi-3D modellering av resistivitetsfördelningen. Från Aarhus Workbench programvara kan resistivitetsmodellerna exporteras för vidare tolkning och bearbetning i andra programvaror.

Geofysiska markmätningar

Inom Laholms undersökningsområde har ett flertal tidigare geofysiska markmätningar utförts av SGU. De metoder som har använts i området är ERT (elektrisk resistivitetstomografi), georadar och seismik. Inom detta projekt har även en kompletterande undersökning utförts med så kallad tTEMteknik (towed transient electromagnetic), i sydöstra delen av undersökningsområdet Laholm. Fyra mätprofiler av ERT som konsultbolaget WSP utfört inom undersökningsområdet Laholm har också ingått i underlagsmaterialet. Läget av de nya geofysiska markmätningar redovisas i figur 4.

För Falkenberg finns det inga befintliga geofysiska mätningar i SGUs regi. Det finns däremot geofysiska data från markmätningar både i Falkenberg och i Laholm i form av undersökningar utförda



Figur 5. Illustration som visar bearbetningsprocessen i Aarhus Workbench. Data granskas både längs en tidslinje samt i enskilda TEM-sonderingar. Störningar rensas bort och sedan inverteras data till resistivitetsmodeller.

av teknikkonsulter inom olika uppdrag. Dessa finns inte att tillgå i SGUs databaser och insamling och behandling av sådan data har ansetts som alltför resurskrävande inom ramen av projektet.

ERT (Elektrisk resistivitetstomografi)

Vid en ERT-mätning mäter man potentialskillnaden av en utsänd ström i marken mellan två potentialelektroder. Genom att variera avståndet mellan elektroderna kan man få olika djupkänning. Resultatet blir en tvärsektion med resistivitetsfördelningen under mätprofilen till ett djup av ca 80 m (beroende på profilens längd och markens resistivitet). Metoden syftar oftast till att kartlägga förekomsten av olika jordlager speciellt med avseende på ler- och vatteninnehåll.

Georadar

Georadar är en geofysisk mätmetod som använder högfrekventa elektromagnetiska vågor som reflekteras när de elektriska egenskaperna i marken förändras. Vid gynnsamma förhållanden kan detaljerad information som till exempel lagerföljder och grundvattenyta observeras ner till ett djup av ca 10–30 m (beroende på frekvens på sändare).

Seismik

De seismiska mätningar som har utförts inom undersökningsområdet i Laholm är av typen refraktionsseismik. Metoden baseras på att en skapad energipuls (oftast från en nedgrävd sprängladdning) rör sig med olika hastigheter i olika typer av material beroende på dess elastiska egenskaper och densitet. Energipulsens utbredning registreras i sensorer, så kallade geofoner. Gånghastigheten på olika djup tolkas sedan till olika geologiska material.

tTEM (towed transient electromagnetic method)

tTEM-mätningar använder sig av samma princip som ATEM-mätningar men utförs på marken genom att man drar en sändarspole och en mottagarspole på en släde efter en fyrhjuling. Mätpunkter och mätlinjer är tätare jämfört med ATEM och därmed blir den rumsliga upplösningen också bättre. Däremot är djupkänningen mer begränsad, ca 70 meter, men beror av markens resistivitet och sändarens strömstyrka. Med tTEM-mätningar kan detaljerade modeller konstrueras av jordlagren och dess struktur.

SGU använde sig av tTEM-mätningar i ett område i Laholms kommun för att testa denna metod som ett komplement till ATEM. De preliminära resultaten redovisas i bilaga 3 och visar på att metoden är lämplig att använda för att få en bättre detaljeringsgrad i intressanta områden men ändå få den tredimensionella täckningen som ATEM-data har, vilket inte är fallet med många andra markmätningar. Inom ramen för detta projekt har endast en inledande granskning och databearbetning gjorts av insamlad tTEM-data. Den slutliga bearbetningen kommer så småningom att vara tillgänglig för vidare analys i SGUs databas för geofysik.

Brunnsarkiv och borrningar

Lagerföljder

Information om jordlagerföljder har hämtats från olika databaser förvaltade av SGU. Majoriteten av lagerföljdsinformationen kommer från Brunnsarkivet som består av borrprotokoll inskickade från olika typer av borrningar, framför allt för enskild vattenförsörjning och energibrunnar. Dessa data är öppna och fritt tillgängliga på SGUs webbplats. Under arbetet har även 118 punktdata från Trafikverkets geotekniska borrningar i Falkenbergs kommun, som utförts i samband med utbyggnad av Europaväg 6 (E6) som genomkorsar området, lagts in i databas. Inom Laholm har uppgifter från 714

brunnar och sammanlagt 123 sonderingar från SGUs jord- och grundvattenkartering ingått som underlag (fig. 6A). I Falkenberg har data från 444 brunnar och 66 borrningar från jordartskarteringen använts (fig. 6B).

Den geografiska noggrannheten för brunnsuppgifter kan variera mycket och kan ha en positionsosäkerhet på över 200 meter. Data från Brunnsarkivet har gett jorddjupsuppgifter och lagerföljder i jord och berg, samt i vissa fall kapacitetsuppskattning och grundvattennivåer. Kvaliteten på inhämtat underlag om lagerföljder varierar stort beroende på vad syftet med borrningen varit. En borrning från SGUs jordartskartering har i regel pålitlig information för i princip varje meter medan det vid en borrning för en energibrunn till en villa ibland endast anges övergång mellan jord och berg. I arbetet med att ta fram en enhetlig lagerföljdsbedömning har en sammanslagning och förenkling av de hundratals olika lagerföljdsinformationer som finns i databaserna gjorts. Kapacitetsuppskattningar och grundvattennivåer från brunnsdata är osäkra då de ofta är gjorda i direkt anslutning till att borrningen genomförts och sannolikt utan att ett tillstånd av tryckjämvikt med omgivande grundvattenmagasin uppnåtts.



Figur 6. Borrningar från SGUs databaser samt lägena för de sonderingar och borrningar som utförts i SGUs regi under projektets gång inom undersökningsområdena i A) Laholm och B) Falkenberg.

Utförda jordborrning och sonderingar

I Laholmsområdet utfördes elva skruvborrningar eller sonderingar (fig. 6A) efter att ATEM-data bearbetats och tolkats. Borrplatserna lokaliserades i områden där tolkning av data visade på goda förutsättningar ur hydrogeologisk synvinkel eller där lagerföljdsinformation behövdes för att underlätta tolkning i speciellt svårtolkade områden. All underlagsdata finns i SGUs databas för grundvattenkartering (parameterdatabasen). Information från några av platserna finns i redovisningen av lokala förhållanden i avsnittet *Utvalda geologiska miljöer och hydrogeologisk tolkning* under resultatdelen för Laholm.

Under sommaren 2018 genomförde SGU en 104 meter djup kombinerad hammar- och kärnborrning för att undersöka jordlagren och kritberggrunden i Laholmsområdet (fig. 6A). Syftet var att använda informationen som stöd till tolkningen av ATEM-mätningarna och att bedöma grundvattenförhållandena i kritberggrunden. Resultaten från denna borrning redovisas i avsnittet *4. Kritberggrund, exempel Skummeslövsstrand.*

I Falkenbergsområdet utfördes åtta skruvborrningar eller sonderingar (fig. 6B) innan ATEM-data bearbetats och tolkats. Platserna valdes ut med hjälp av den kunskap SGU hade om området vid tillfället. Borrningarna utfördes för att ge jordlagerföljder som kunde ge stöd i tolkningsarbetet. All data finns i SGUs databas för grundvattenkartering (parameterdatabasen). Information från några av platserna finns redovisade i bilaga 2.

BEARBETNING OCH DATAANALYS

Genom bearbetning och analys av data kan den geofysiska informationen användas till tolkning av geologi och hydrogeologi. En successiv genomgång av samtliga mätprofiler (flyglinjer) har gjorts där resistivitetsdata tillsammans med geologisk och annan geofysisk information studeras och jämförs. Efter hand erhålls en bild av vad resistivitetsfördelningen kan motsvara för litologi (till exempel lera eller sand) eller hydrogeologisk miljö inom olika delar av undersökningsområdet.

3D-modeller

Ett sätt att visualisera geologisk information är med hjälp av 3D-modeller (fig. 7). SGU använder sig av programvaran *GeoScene3D* (I·GIS) för bearbetning och tolkning av framför allt SkyTEM-data. Programmet innefattar både profilsektioner, plankartor och 3D-fönster som möjliggör flera olika sätt att studera data på. Det går också att skapa 3D-modeller för både markens resistivitetsfördelning och den geologiska tolkningen av området i programmet.

En 3D-modell kan antingen vara uppbyggd genom att varje geologisk enhet har definierats med en över- och en underyta. Ytorna är uppbyggda av ett rutnät (en grid) där varje ruta har en bestämd storlek i xy-led och innehåller ett värde för nivån i z-led. I denna rapport kallas en 3D-modell uppbyggd av över- och underytor för ingående volymer för en *3D-lagermodell* se figur 7.

Det andra sättet att bygga upp en 3D-modell på är att definiera en volym uppbyggd av voxlar det vill säga små kuber. En voxel är en tredimensionell motsvarighet till en pixel och motsvarar därmed en volymenhet med en bestämd dimension – kan liknas vid en byggkloss. I denna rapport kallas en sådan modell för en *3D-voxelmodell*, se figur 7. Varje voxel innehåller ett värde som kan motsvara olika egenskaper beroende på vad det är för modell. I en resistivitets 3D-voxelmodell har varje voxel ett värde för resistivitet (t ex 80 Ohmm) och i en litologisk 3D-voxelmodell har varje voxel ett värde för en litologi (t ex "lera" eller "sand").

Arbetsgången för att ta fram en geologisk 3D-modell från ATEM data innefattar grovt följande steg:

1) Fältmätningar

Undersökning sker med helikopterburet TEM system.

2) Datarensning

Rådata granskas och störningar och andra fel rensas bort.

3) Resistivitetsmodeller

Kvarvarande rådata inverteras till resistivitetsmodeller. Detta är en numerisk bearbetning där marken delas in i ett antal bestämda lager (i detta fall 30 stycken) och rådata omvandlas till en beräknad resistivitet för varje lager. Beräkningen görs i punkter på ett bestämt avstånd, här ca 30 m, längs med flygprofilerna med antagandet att resistiviteten endast varierar med djupet, därför är dessa endimensionella resistivitetsmodeller. Den resulterande datastrukturen kan liknas med ett stort antal geofysiska sonderingar längs med flyglinjerna med ungefär 30 m mellan varje sondering, se figur 7. Denna process beskrivs närmare i avsnitt *Resistivitetsmodell.*

4) Interpolering av resistivitetsmodeller till resistivitets 3D-voxelmodell

De framtagna resistivitetsmodellerna interpoleras till en resistivitets 3D-voxelmodell där varje voxel innehåller ett beräknat värde för resistivitet.

5) Sammanställning av redan tillgänglig geologisk information

Parallellt med bearbetning av ATEM-data sammanställs all tillgänglig underlagsinformation i form av lagerföljdsdata, geologiska kartor, höjdmodell, andra geofysiska mätningar med mera.

6) Konceptuell geologisk modell

Ett viktigt underlag för tolkning av ATEM-data är en geologisk konceptuell modell för undersökningsområdet. Upprättande av sådan sker utifrån geologisk data och kunskap för området.

7) Geologisk och hydrogeologisk tolkning av resistivitetsmodeller Resistivitetsmodeller studeras i profilvy längs alla flyglinjer och tolkas i geologisk och hydrogeologisk kontext.

8) Upprättande av:

a) geologisk 3D-lagermodell

Om den geologiska uppbyggnaden består av mer eller mindre horisontella lager som går att identifiera i resistivitetsdata kan dessa avgränsas med en över- och en underyta. Detta görs genom att sätta punkter i övergångszoner. Punkterna interpoleras sedan till ytor där varje geologisk enhet har en över- och en underyta (fig. 7). Detta kräver generalisering och är inte alltid möjligt eller motiverat vid komplex geologi där olika enheter förekommer i linser istället för lateralt uthålliga lager. Det är dock ofta möjligt att tolka bergets överyta eftersom denna finns överallt.

b) geologisk 3D-voxelmodell

Den framtagna **resistivitets** 3D-voxelmodellen kan översättas till en **geologisk** 3D-voxelmodell där varje voxel istället för ett resistivitets värde har en kod motsvarande en viss litologi. Tolkningen går då ut på att identifiera resistivitetsintervall för olika litologier. Detta är ett bra sätt att hantera komplex geologi med linsstrukturer istället för att generalisera till ytor i en 3D-lagermodell som beskrivs ovan (fig. 7). Det är dock svårt att bestämma resistivitetsintervall som är representativa och trovärdiga för specifika litologer. Verktyg och metoder för detta moment beskrivs mer utförligt i nästföljande avsnitt *Analys av resistivitetsfördelning*.



Figur 7. Sammanfattning av arbetsflödet för att ta fram en geologisk 3D-modell från ATEM-data.

Resistivitetsmodeller

Rådata från ATEM-mätningarna, som består av avklingningskurvor för det inducerade magnetfältet, inverteras till resistivitetsmodeller. Kvaliteten på resistivitetsmodellerna beror på ingående rådata. En uppskattad "djupkänning" (DOI, depth of investigation) fås för varje resistivitetsmodell vilket är en indikation på hur djupt resistivitetsmodellen är tillförlitlig. Resistivitetsmodellen består av 30 lager med ökande mäktighet mot djupet. Då syftet främst är att studera jordlagerföljderna inom detta projekt har modellen definierats så att det är tunna lager i ytan (en meter) som sedan ökar stegvis (fig. 8). Samma lagerindelning för resistivitetsmodellerna användes inom båda undersökningsområdena.

Resistivitetsmodellerna importeras och studeras i programmet GeoScene3D. Främst studeras data längs de profiler där de har blivit insamlade (det vill säga längs flyglinjerna). Det finns möjlighet att interpolera resistivitetsmodellerna till en resistivitets 3D-voxelmodell (fig. 7) som då fylls med beräknade värden för resistiviteten utifrån resistivitetsmodellerna. Dimension för voxlarna bestäms beroende på geologisk förväntansmodell och datapunktsfördelning för att få en hanterlig datavolym som ändå har tillräcklig precision.



Figur 8. Figuren illustrerar en resistivitetsmodell på tre olika sätt. Längst till vänster visas de modellerade resistivitetsvärdena för varje lager, i mitten visas samma data som en färgkodad stapel, och längst till höger som ett diagram med resistivitet som funktion av djup. Områdena som är skuggade visar en uppskattad nivå till vilken modellen anses som pålitlig (DOI, depth of investigation).

Analys av resistivitetsfördelning

Klusteranalys av resistivitetsmodeller

Genom att jämföra hur resistiviteten varierar på djupet i varje resistivitetsmodell kan man identifiera områden med olika resistivitetsmönster. Dessa variationer beror på den geologiska uppbyggnaden. En sådan kvalitativ indelning av undersökningsområdena i olika regioner går att utföra i programvaran GeoScene3D genom en så kallad klusteranalys. Analysen styrs genom att ansätta hur många klasser som resistivitetsmodellerna ska delas in i, samt vilka lagernummer i modellen som ska inkluderas i jämförelsen. Utifrån de mönster som framträder är det möjligt att avgränsa delområden med liknande geologiska förhållanden. Inom delområdena kan sedan vidare analyser göras för att till exempel ta fram lokala gränsvärden för resistivitet kopplat till olika litologier inom just det delområdet.



Figur 9. Ungefärliga resistivitetsintervall för olika litologier. Figur modifierad efter Triumf (1992).

Resistivitetsintervall för olika litologier

Olika litologier som till exempel morän och kalksten har olika resistivitetsintervall beroende på porositet, vattenmättnadsgrad och innehållet av lermineral. Både vatten och lermineral leder ström bra och har alltså låg resistivitet medan en torr sand leder ström sämre och har alltså en högre resistivitet.

Endast ungefärliga indelningar av vilken resistivitet som motsvarar en specifik litologi är möjliga att ta fram. Ofta överlappar de olika intervallen för olika litologier (fig. 9), och dessutom kan samma litologi ha olika intervall i olika områden.

I programvaran GeoScene3D är det möjligt att automatiskt jämföra litologi från lagerföljdsinformationen mot resistivitet för att analysera vilket resistivitetsintervall olika litologier har. Jämförelsen är en statistisk analys mellan kända litologier från borrhål och resistiviteten i samma punkt som hämtas från den interpolerade resistivitets 3D-voxelmodellen. Kvaliteten på analysen beror på de ingående parametrarna; de interpolerade resistivitetsvärdena och lagerföljdsinformation. För en lyckosam analys krävs att det finns tillräcklig och pålitlig information avseende litologi samt att det finns en trovärdig resistivitetsfördelning från 3D-voxelmodellen inom samma område. Viktigt är alltså att data från borrningar är av hög kvalitet, både när det gäller redogörelse av litologisk lagerföljd och noggrannhet i platskoordinater.

I figur 10 visas ett exempel på resultatet av en analys av resistivitetsfördelningen mellan litologierna sand och grus och lera i ett delområde i Laholm. De olika kurvorna visar sannolikheten (y-axeln) för att en viss resistivitet (x-axeln) motsvarar sand och grus eller lera

Där kurvorna skär varandra ligger gränsvärdet mellan olika litologier, i detta fall 55 Ohmm. För resistiviteter under 55 Ohmm är det störst sannolikhet att det är lera medan det för resistiviteter över gränsvärdet är mer sannolikt att det förekommer sand eller grus där. Detta är alltså resultatet från en statistisk analys och stämmer inte helt med generella värden (fig. 9). Troligen innehåller det som har klassats som sand och grus också en del silt och lera som sänker resistiviteten.

Gränsvärden tas fram för de litologier som ska ingå i den geologiska 3D-voxelmodellen. Denna byggs upp genom att ansätta villkor i den framtagna resistivitets 3D-voxelmodellen att alla voxlar inom utvalda gränsvärden ska motsvara en viss litologi.

Sannoliket (%)





Det är inte alltid möjligt att göra en automatisk översättning mellan den framtagna resistivitets 3D-voxelmodellen och litologier. Detta kan bero på kvaliteten på resistivitets 3D-voxelmodellen och underlagsdata men även på att den geologiska komplexiteten i området kan vara för hög i relation till mätpunktsfördelning. Till exempel är denna översättning mer lyckosam i större områden med horisontellt uthållig geologi jämfört med en heterogen och snabbt skiftande geologi.

Översättningar kan göras i mindre områden automatiskt eller manuellt med geologisk tolkning av vad resistivitetsfördelningen kan motsvara för litologi. Även om en direkt översättning från resistivitet till litologi i en geologisk 3D-voxelmodell inte är trovärdig finns ändå mycket värdefull information att utläsa i data. Analyser kan istället göras på resistivitetmodellerna längs med flygprofiler. Då studeras resistivitetsanomalier och tolkas till vad det kan motsvara för geologisk eller hydrogeologisk miljö. En resistivitetsanomali är en avvikelse jämte omgivande resistivitetsfördelning och kan både vara positiv (högre än omgivningen) eller negativ (lägre än omgivningen). Tillsammans med annan geologisk information vid jämförelse mellan flygprofilerna kan intressanta områden avgränsas.

Lagermodell

Ett alternativ till att skapa en geologisk 3D-voxelmodell genom översättning av resistivitet direkt till litologi är att först skapa en så kallad geologisk 3D-lagermodell (se punkt 8a under avsnitt *3D-modell*). Strukturen för lagermodellen kräver att alla geologiska enheter har en kontinuerlig över- och underyta. Gränser mellan olika geologiska lager identifieras i resistivitetsdata och övrig tillgänglig information längs med profiler. För att kunna fylla sammanhållna volymer måste över- och underyta interpoleras för varje geologisk enhet. Detta är lättare vid plan horisontell geologi med stora sammanhållna enheter. Det är desto svårare i områden med en skiftande topografi och komplexa jordlager med linser och tunna lager som övergår och går in i varandra. Då krävs kraftiga förenklingar för att kunna åskådliggöra geologin i tre dimensioner, något som kan leda till att modellen blir alltför generell och inte speglar den tillgängliga information som finns i data. För de undersökta områdena gäller generellt den senare beskrivningen och inom ramen för detta projekt har det därför inte tagits fram någon heltäckande geologisk 3D-lagermodell på detta sätt. Lagergränsen mellan jord och berg (bergöveryta) har dock tolkats på detta sätt i stora delar av undersökningsområdena.

Tolkning av bergöveryta

Resistivitetsmodellerna utgör oftast ett mycket bra underlag för identifiering av bergöverytan då lågresistiva jordlager överlagrar en högresistiv berggrund i form av urberg (fig. 11A). I fallet med underlagrande sedimentärt berg kan det vara svårare eller omöjligt att urskilja en gräns. Detta beror på att resistiviteten för sedimentärt berg ofta överlappar jordlagernas resistivitet. Däremot går det ofta att få information om resistivitetsfördelning i det sedimentära berget och urskilja olika litologier inom denna.

Svårigheter vid tolkning av berggrundens överyta uppstår även då berget överlagras av mycket mäktiga (ca 30 m) lågresistiva jordlager i form av lera (fig. 11B). Vid dessa förhållanden dämpas ATEM-signalen så mycket att endast lite tillförlitlig information går att få fram inom och under detta lager.

Tolkning av bergets överyta har gjorts manuellt genom att gränsen mellan bergöveryta och jordlager markeras med punkter längs varje flygprofil. Dessa punkterna har sedan interpolerats till en kontinuerlig bergöveryta inom mätområdet. I områden utan eller där bergöverytan inte har gått att urskilja har bergöverytan från SGUs befintliga jorddjupsmodell (Daniels & Thunholm, 2014) använts. De båda modellerna för bergets överyta har sammanfogats för att få fram en kontinuerlig yta som täcker undersökningsområdena. För att få en jämn övergång mellan ny och befintlig bergöveryta har en övergångszon på 100 m använts.



Figur 11. Exempel på okomplicerad (A) respektive mycket svår/ej möjlig (B) tolkning av bergöverytans läge.

LAHOLM

Undersökningsområdet Laholm är beläget i södra delen av Laholms kommun och norra delen av Båstads kommun (fig. 12). Området är ca 300 km² och består till största delen av ett slättlandskap med höjdområden i öster och ett markant höjdområde (Hallandsåsen) i söder (fig. 12). Största delen av området ligger under nivån för högsta kustlinjen (ca 50–55 m ö.h.). Området domineras nästan helt av åkermark (ca 75 %). Övrig mark består av skogsmark i öster, söder och längs havet. Det finns redan idag flera viktiga kommunala grundvattentäkter inom området. SGU bedömer att det finns outnyttjade grundvattenresurser i berggrunden, i den kritberggrund som finns i de sydvästra delarna, men framför allt i jordlager bestående av sand och grus.



Figur 12. Högsta kustlinjes läge och befintliga vattenskyddsområden inom undersökningsområdet Laholm.

Geologisk beskrivning

Berggrund

Inom Laholms undersökningsområde förekommer både sedimentär berggrund (kritberggrund) och urberg i form av gnejs (fig. 13). Det finns väldigt få hällar i området vilket gör att berggrundskartan i huvudsak baseras på observationer från omgivande områden, geofysiska data och information från borrningar (Lundqvist & Carlsäter-Ekdahl 2013). Den sedimentära berggrundens uppbyggnad är känd från äldre blottningar som inte längre är tillgängliga. Dess utbredning baseras på relativt få borrningar i området och är därmed ganska osäker, speciellt i norr och i öst. Troligen är inte utbredningen



Figur 13. Berggrundskarta över Laholmsområdet baserad på SGUs berggrundsgeologiska kartdatabas (SGU, 2019: Berggrund 1:50 000 - 1:250 000, södra Halland).

sammanhängande inom området så som den visas på berggrundskartan. Den dominerade berggrundsstrukturen i området är förkastningsbranten utmed Hallandsåsens nordsida.

Urberg (gnejs)

Urberget består främst av gnejs och är bara blottat i utkanten av områdets norra och östra delar. Enstaka blottningar förekommer även längs Lagan och Stensån samt i Hallandsåsens förkastningsbranter.

Regionalt kännetecknas berggrunden av genomgående kraftig deformation och omkristallisation under höga tryck och temperaturer (Pinan Llamas m.fl. 2015). Den domineras av förgnejsade och ådrade intrusivbergarter som har sitt ursprung i prekambriska gråröda till grå granitiska och granitlika bergarter (Möller & Andersson 2018). Mörka bergartsled (omvandlad diabas och gabbro) uppträder som sönderslitna linser, lager eller enstaka större sammanhängande kroppar. Det finns även helt eller delvis höggradigt metamorft omkristalliserade diabasgångar som ställvis klipper sidobergets gnejsstruktur.

Veckning, sträckning och skjuvning av berggrunden har gett upphov till ett komplext plastiskt deformationsmönster som tydligt återspeglas i magnetanomalikartan (fig. 14). En del plastiska deformationszoner har reaktiverats av yngre spröd tektonik. I avsaknad av fältdata kan det vara svårt att skilja plastiska deformationszoner från sprick- och förkastningszoner med samma riktning, den södra delen av undersökningsområdet utgör ett sådant område.

Spröda deformationszoner är av intresse eftersom dessa har potential att agera som stora grundvattenmagasin. SGU har begränsad dokumentation av spröda deformationsstrukturer i området. Fältdata från flygområdet (två lokaler) och närmast angränsande område (sex lokaler) pekar på förekomst av branta sprickor med dels västnordvästlig, dels nordsydlig till nordnordöstlig riktning (fig. 13). Samtolkning av berggrundsgeologiska fältdata och geofysiska data indikerar att nordnordvästligt till nordnordöstligt strykande lågmagnetiska lineament som ställvis även följer tydliga topografiska lineament motsvarar branta sprick- och förkastningszoner (Lundqvist & Carlsäter Ekdahl 2013). I likhet med omgivande områden är berggrunden ofta sprickrikare och rödfärgad i anslutning till dessa sprickoch förkastningszoner.

Framträdande västnordväst–ostsydostliga sprick- och förkastningszoner uppträder i berggrunden norr och söder om undersökningsområdet (Hallandsås, Wikman och Bergström 1987, Falkenbergsområdet, Andersson m.fl. 2019). Det är möjligt att det framträdande västnordväst–ostsydostliga magnetanomalimönstret i södra delen av flygrutan (fig. 14) motsvarar ett område där orienteringen på duktila deformationszoner sammanfaller med branta sprick- och förkastningszoner.

Kritberggrund

Kunskapen om kritberggrundens uppbyggnad i Båstadbassängen (sydvästra delen av undersökningsområdet) är främst baserad på uppgifter från brunnsborrningar och äldre beskrivningar av ett fåtal berggrundsskärningar vid Båstad som inte finns kvar idag. Förekomst av kalkstensblock utmed Hallandsåsens norra brant indikerar nära anstående kritberggrund inom en zon närmast Hallandsåsens norra avgränsning (fig. 15). Äldre beskrivningar av fossilfynden från dessa tidigare blottade lokaler visar att kritberggrunden är av alb–campan ålder (fig. 15). I en rapport av Christensen (1993) ges en bra sammanfattning av de äldre beskrivningarna. Hans arbete är också det senaste som behandlar kritberggrundens uppbyggnad i Båstadbassängen.

I berggrundsbeskrivningen till Halmstad SV (Wikman & Bergström 1987) tolkas att kritberggrund förekommer relativt ytligt i hängande bergblock utmed Hallandsås förkastningszon. Kritberggrunden (alb–cenoman) som bildades före förkastningsrörelserna förkommer här ytligt på hängande gnejssblock i förkastningszonen. De största rörelserna i förkastningen skedde under campan tid för ca 75 miljoner år sedan i samband med kompression i jordskorpan och upphöjningen av de skånska urbergshorstarna. Rörelserna ledde även till att ett nedsänkt område (Båstadbassängen) bildades norr om Hal-



Figur 14. Magnetiskt residualfält med befintliga (i SGUs berggrundsgeologiska databas 1:50 000 - 1:250 000) tolkade deformationszoner (sprickzoner) symboliserade utifrån tolkningsunderlag.

landsåsförkastningen. Likartade förhållande rådde samtidigt i Kristianstadsområdet där kritberggrund bildades i en sedimentbassäng norr om Nävlingeåsens och Linderödsåsens förkastningszoner. Under yngre krita var Båstads- och Kristianstadsområdena ett sammanhängande bassängområde. I den forna strandzonen närmast de förkastningsavgränsade urbergshorstarna avsattes medel- och finkornigt skalgrus med varierande halt av kvartssand och konglomerat med begartsfragment av kristallint urberg och äldre sedimentär berggrund. Vid Båstad har konglomeratiska lager beskrivits från lokalerna i Stensån och Gropamöllan samt i block från Gräsryd. Däremot dominerades lagerföljden i Malens, nära Båstad, nedlagda stenbrott av medelkornig vit till gulvit skalgruskalksten. Norrut i Båstadbassängen avsattes successivt allt finare karbonatpartiklar samtidigt som inslaget av lermineral ökade, vilket gör att berggrunden här domineras av märgelsten.



Figur 15. Båstadbassängen med kritberggrundens utbredning. Profilen går från norr mot söder.

Båstadbassängens kritberggrund är drygt 100 m mäktig i de södra delarna. Norrut avtar mäktigheten successivt bland annat på grund av att kritberggrunden påverkats av senare erosion. Här är jordlagren ofta 40–50 m mäktiga. Norr och nordost om Södra Mellbystrand, Vrångarp och öster om Hasslöv försvinner kritberggrunden som sammanhängande berggrund. Isolerade mindre förekomster påträffas även utanför detta område vid borrningar.

Kritberggrunden vilar på en topografiskt oregelbunden urbergsyta, den så kallade subkretaceiska reliefen som kan ha en höjdvariation på drygt 20 m (Wikman & Bergström 1987). Lokalt kan urberget vara kraftigt vittrat, speciellt i anslutning till förkastningszonen i söder.

Den övre delen av kritberggrunden är väl beskriven från skärningar och borrningar i anslutning till Malens stenbrott i Båstad. I stenbrottet dominerar skalgruskalksten från mellersta campan medan skärningar och borrningar söder om brottet i Gropamöllan visar på ytnära förekomst glaukonitiska och konglomeratiska lager av alb–cenoman ålder som överlagrar ett vittrat urberg. Ytterligare några borrningar ger information om den stratigrafiska uppbyggnaden av kritberggrunden men generellt är stratigrafiska representationen av berggrunden dåligt känd. Merparten av kritberggrunden bedöms vara av mellancampan ålder vilket är ungefär samtidigt med de huvudsakliga förkastningsrörelserna och bildningen av Båstadbassängen.

Jordarter

Laholmslätten är ett flackt område som i söder begränsas av Hallandsåsens förkastningsbrant. Området sträcker sig från havet i väster till ett berg- och moränområde i öster, på nivån ca 50–55 m ö.h. Jordlagren i markytan utgörs till största delen av sand, men även lera förekommer (fig. 16). På Laholmslätten finns vanligen en lagerföljd med en ytligt liggande sand, därunder lera och längst ner sand och grus igen. Dessa lager beskrivs nedan som extramarginala deltan, glacial lera respektive isälvsavlagringar. Närmast markytan ligger dessutom ofta ett lager svallsediment. Jorddjupet är relativt stort på Laholmslätten och berggrunden går i dagen bara på ett fåtal ställen. Jordlagren avsattes framför allt under den senaste istiden, Weichselistiden, och den efterföljande postglaciala tiden. Landisen smälte av från Laholmslätten för ca 16 000 år sedan (fig. 17A–D). Landet var då nedpressat under isens tyngd och området låg under vatten när isen försvann (fig. 17A–D). Den sista isrörelsen över området var från nordost. Nedanstående beskrivning av Laholmsområdets jordarter baseras främst på de jordartgeologiska kartorna med tillhörande beskrivningar (Ringberg 1995, Daniel 2006) samt på Robison (1983) och illustreras med SGUs jordartskarta i figur 16.

Morän går i dagen på ett fåtal ställen i området. Runt Veinge finns några höjdpartier med morän och berghällar. I östra delen av området ansluter slätten till högre liggande områden med morän och berghällar. Moränen ligger i regel direkt på berggrunden och avsattes före den paleogeografiska miljön i figur 17A. Den är oftast bara några meter mäktig och har en sandig sammansättning och normal blockhalt. Morän förekommer också under de mäktiga sand- och leravlagringarna på slätten, något man ser i lagerföljdsinformation från Brunnsarkivet men dess utbredning är dåligt känd.

Isälvslavlagringarna avsattes av inlandsisens smältvatten i direkt anslutning till isen; i isälvstunnlar under isen, ovanpå isen eller framför iskanten. Dessa avlagringar avsattes före den paleogeografiska miljön i figur 17A. Dessutom finns ofta ett tunt lager grusiga isälvssediment under yngre lager av glacial lera och silt och även extramarginala sanddeltan som bildats en bit från iskanten. Längs nedre delen av Hallandsåsens norra sluttning, vid Vindrarp och Yllevad löper en osammanhängande isälvsavlagring med terrasser och korta åsar. Grusig sand dominerar avlagringens västra del, medan stenigt grus dominerar i åsarna längre österut. Längre mot öster utbreder sig ett småkuperat område med enstaka små rullstensåsar bestående av stenigt grus.

På Laholmslätten finns ett antal israndsdeltan. Dessa är deltan som avsatts vid isranden där en isälv mynnat i vatten, i det här fallet Västerhavet, under ett stillestånd i isens tillbakaryckning. Isranddeltan avsattes strax före den paleogeografiska miljön i figur 17A.



Figur 16. Jordartskarta över undersökningsområdet Laholm. De cerisa numrerade polygonerna visar isranddeltan. Våxtorpsavlagringen (1), Ålstorpsavlagringen (2), Ränneslövsavlagringen (3), Edenbergaavlagringen (4) och Veingedeltat (5).

Det sydligaste deltat är Våxtorpsavlagringen (1). Norrut följer Ålstorpsavlagringen (2), Ränneslövsavlagringen (3), Edenbergaavlagringen (4) och Veingedeltat (5). Gemensamt för dessa deltan är att de har en plan yta som i de flesta fall ligger 50–55 m ö.h., vilket motsvarar nivån för högsta kustlinjen. Ränneslövsavlagringen och Edenbergaavlagringen byggdes dock inte ända upp till den dåvarande havsnivån. I deltaplanet finns ofta dödishålor, det vill säga gropar som visar var det legat isstycken som brutits loss från inlandsisen, avsatts i sedimenten och slutligen smält bort. Deltan har ursprungligen haft en sluttande avlastningsbrant mot väster, en plan överyta och en iskontaktbrant mot öster. Gruset i flera av avlagringarna är dock till stora delar utbrutet, vilket gör det svårt att rekonstruera den ursprungliga morfologin och uppbyggnaden. Deltan är ofta uppbyggda med en kärna av grovt, stenigt grus. Den överlagrande mellanbädden består av sand eller grus. Överst finns ett lager svallgrus. Jordmäktigheterna kan vara mycket stora, till exempel i Veingedeltat finns uppåt 40 m isälvssediment.

På Laholmslätten fortsatte avsättningen av sand långt efter att isfronten lämnat området (fig. 17A– B). Vattnet från den smältande inlandsisen transporterades bland annat genom Lagans dalgång under en lång period, medan isen smälte i Smålands inland. Stora mängder sand fördes ut i det dåvarande havet och där bildades stora deltan, så kallade extramarginala deltan på successivt lägre nivåer, allteftersom landet höjde sig. Till stor del byggdes dessa deltan upp på ett underlag av tidigare avsatt glacial lera. Dessa deltan har beteckningen "Isälvssediment, sand på lera och silt" på den tryckta jordartskartan. De är utbredda och nästan helt plana och består av sand, som kan vara mycket mäktig.

Glacial lera och silt bildades genom att de finkornigaste partiklarna transporterades ut i öppet vatten av smältvattnet från isen (fig. 17A–B). Där avsattes de på havsbotten. Dessa jordarter förekommer närmast markytan på många ställen i området. Utbredningen är dock betydligt större än vad som syns



Figur 17. Områdets paleogeografiska utveckling. A. för 15 200 år sedan. B. för 13 700 år sedan. C. för 6 000 år sedan. D. nutid. Dagens strandlinje är markerad med röd linje

på jordartskartan. Leran och silten täcks nämligen ofta av ett ytligt lager sand. Närmast kusten utgörs sanden av svallsand i ett vanligen ganska tunt lager. Längre österut ligger mäktiga lerlager under extramarginala deltan.

I samband med landhöjningen efter den senaste istiden utsattes tidigare avsatta jordarter för vågornas och strömmarnas påverkan (fig. 17A–C). Jordarternas ytliga delar omlagrades och avsattes som svallsediment på lägre nivåer. Stora delar av Laholmslätten täcks av svallsand som bildar plana fält. Sanden är vanligen 0,5–5 m mäktig och den underlagras oftast av lera. Längs hela kuststräckan i området löper en zon med flygsand i dyner. Zonen med kustdyner är cirka en kilometer bred, men även längre mot öster förekommer troligen en hel del flygsand – utan dynformer. Flygsanden består av fin- och mellansand och är mycket välsorterad och avsattes främst under den paleogeografiska miljö som visas i figur 17D. Bildningen av flygsand pågår än idag. Vid starka vindar transporteras sand från stränderna och vegetationsfria delar av dynerna in över de kustnära områdena.

Svämsediment avsätts längs vattendrag i samband med översvämningar, en process som är aktiv även i nutid. Svämsedimenten i området består till största delen av sand och avsattes under den paleogeografiska miljö som visas i figur 17C–D. Svämsand finns utmed flera vattendrag i området, men framför allt utmed Lagan, Smedjeån och Stensån. Tunna lager av kärrtorv finns i flera lågt liggande områden på Laholmslätten. Torven är i regel uppodlad.

Hydrogeologiska förhållanden och vattenförsörjning

Grundvattenmagasin i jordlagren

Grundvattentillgångarna på Laholmsslätten finns i grundvattenmagasin som utgörs av ett antal mer eller mindre tvärgående isälvsavlagringar vilka ställvis är dolda av mäktiga lerlager. Dessa lerlager kan i sin tur vara överlagrade av i huvudsak sandiga svallsediment i vilka ytliga, lokala grundvattenmagasin kan förekomma. I kommande beskrivning av grundvattenförekomster och i figur 18 redovisas preliminära grundvattenmagasin, den slutgiltiga redovisningen av grundvattenmagasinens utbredning kommer göras ihop med resultaten från denna undersökning.

Närmast Hallandsåsen finns grundvattenmagasinet Östra Karup–Våxtorp, vilket är beläget längs Hallandsåsens nordsluttning i Båstads och Laholms kommuner (A i fig. 18). Grundvattenmagasinet Östra Karup–Våxtorp utgörs av en isälvsavlagring som till stora delar är täckt av mäktiga lager av lera och silt. Inom delar av magasinet täcks även leran av ytterligare mäktiga finsandlager. I dessa kan ett övre grundvattenmagasin återfinnas. Uttagsmöjligheten i grundvattenmagasinet Östra Karup–Våxtorp bedöms uppgå till mellan 100 och 125 l/s.

Norr om grundvattenmagasinet Östra Karup–Våxtorp återfinns grundvattenmagasinet Vallberga– Storesjö, vilket beläget i öst–västlig riktning på Laholmsslätten mellan Stensån och Lagan (B i fig. 18). Grundvattenmagasinet Vallberga–Storesjö utgörs av en isälvsavlagring som i de västra delarna är täckt av mäktiga lager av lera och silt. Leran överlagras delvis av finsandlager med cirka tre till åtta meters mäktighet. I dessa kan övre, lokala, grundvattenmagasin återfinnas. Uttagsmöjligheten i grundvattenmagasinet Vallberga–Storesjö bedöms uppgå till mellan 90 och 110 l/s.

Väster om Laholms tätort ut mot Laholmsbukten återfinns grundvattenmagasinet Mellbystrand (C i fig. 18), vilket utgörs av sand och grus med 2 till 35 m mäktighet under finkornigare jordlager. Magasinet Mellbystrand går inte i dagen någonstans, vilket innebär att grundvattenbildningen till magasinet är begränsad. Uttagsmöjligheten bedöms uppgå till ca 15–20 l/s.

Norr om Lagan finns dels grundvattenmagasinet Veinge vid Veinge samhälle (D i fig. 18) och grundvattenmagasinet Skogaby (E i fig. 18). Grundvattenmagasinet Veinge utgörs av en isälvsavlagring som till stora delar är täckt av mäktiga lager av lera och silt. Inom delar av magasinet täcks även leran av ytterligare mäktiga finsandlager. I dessa kan övre grundvattenmagasin återfinnas. Uttagsmöjligheten i grundvattenmagasinet Veinge bedöms uppgå till mellan 75 och 100 l/s. Grundvattenmagasinet

Skogaby utgörs av en flack deltaavlagring belägen nordost om Laholms samhälle i Lagans dalgång. Möjligheterna till större grundvattenuttag bedöms som måttliga till goda, de totala uttagsmöjligheterna bedöms till ca 25 l/s.

Grundvattenmagasinens utbredning är preliminära och kommer troligen att revideras utifrån nytt underlag från ATEM-mätningarna.

Grundvattenmagasin i berggrund

Under stora delar av det undersökta området utgörs berggrunden av gnejs och uttagsmöjligheterna är sett på en nationell skala goda. I de södra och västra delarna ger brunnar i gnejsberggrunden normalt 2 000–6 000 l/tim. De goda uttagsmöjligheterna beror dels på att berggrunden är relativt uppsprucken vilket gynnar större uttagsmöjligheter, samtidigt som de mäktiga jordlagren vilka överlagrar berggrunden även förser berggrundens spricksystem med grundvatten. I de norra och östra delarna av området bedöms uttagmöjligheten vara något lägre, 600–2 000 l/tim. Brunnar för enskild vattenförsörjning är vanligen ca 60–100 m djupa. I de sydvästra delarna av Laholmsslätten återfinns kritberggrund som överlagrar urberget. Endast ett fåtal brunnsborrningar finns nedförda i kalkstenen och dess potential som vattenresurs är inte helt utredd.

Vattenförsörjning

På Laholmsslätten finns kommunal vattenförsörjning både i Laholms och Båstads kommuner (fig. 18). I den isälvsavlagring som finns längs Hallandsåsens nordsluttning återfinns vattenverken i Dömestorp för Laholms kommun och vattentäkten i Eskilstorp för Båstads kommun. Ur dessa bägge vattentäkter finns tillstånd för uttag av ca 3 000 000 m³/år (ca 8200 m³/dygn) för kommunal vattenförsörjning. I Skottorp i Laholms kommun finns en grundvattentäkt i jord som förstärks med konstgjord grund-



Figur 18. A. Grundvattenförekomster, A – Östra Karup–Våxtorp, B – Vallberga–Storesjö, C – Mellbystrand, D – Veinge och E – Skogaby. B. Vattenskyddsområden kring vattentäkter inom undersökningsområdet.

vattenbildning från Smedjeån. Norr om Laholms samhälle, vid Veinge, finns ytterligare en relativt stor kommunal vattentäkt i jordlagren med tillstånd till uttag om ca 2 600 m³/dygn. Öster om Laholm, vid Skogaby finns en liten kommunal vattentäkt med ett uttag på ca 0,5 l/s (43 m³/dygn).

Den enskilda vattenförsörjningen på Laholmslätten baseras i huvudsak på brunnar – antingen grävda i jordlagren eller genom borrade brunnar. De grävda brunnarna är i allmänhet nedförda i den ytliga svallsanden. Ofta kan tillgången vara tillräcklig för enskild vattenförsörjning men problem med dålig vattenkvalitet i form höga nitrathalter förekommer frekvent. Längs Hallandsåsens nordsluttning förekommer att vattenförsörjningen baseras på källor i sluttningen som med självtryck ger vatten till fastigheter längs släntfoten. Borrade brunnar är generellt nedförda i det underliggande urberget. Problem med förhöjda kloridhalter kan förekomma framför allt i området närmast Laholmsbukten.

På Laholmsslätten förekommer ett antal källor med varierade flöden. Ett flertal av dessa återfinns längs Hallandsåsens nordsluttning där grundvattnet från åsen tvingas fram. Ute på Laholmsslätten finns ett antal mindre källflöden i den ovanliggande svallsanden. Källorna uppkommer i sluttningar där grundvattnet rinner fram på det i allmänhet tätare lerlagret som underlagrar svallsanden.

Resultat och områdesspecifika tolkningar

Resultaten redovisas som en översiktlig litologisk tolkning baserad på resistivitetsdata, lagerföljdsinformation och jordartsfördelning och dels en hydrogeologisk tolkning med fokus på intressanta områden ur ett vattenförsörjningsperspektiv.

Figur 19 visar den generella resistivitetsfördelningen i området i ett tvärsnitt från väst till öst. Generellt visar insamlad data en bild som överensstämmer väl med den redan presenterade geologiska beskrivningen. I väst förekommer det vanligen mäktiga lerlager som överlagrar kritberggrund eller urberg (fig. 19). I de centrala delarna finns en övergångszon med mindre mäktiga ler- och siltlager med ställvis över- och underlagrande sand, grus, eller morän (fig. 19). I östra delarna tunnas ler- och siltavlagringarna i allmänhet ut ännu mer och mäktiga sand- och grusavlagringar förekommer både över och underlagrande dessa (fig. 19). I de centrala och östliga delarna av undersökningsområdet består berget av gnejs.



Figur 19. Profil som visar den generella resistivitetsfördelningen i området från väst mot öst inom Laholms undersökningsområde. Svart linje visar tolkad bergöveryta.

Den generella bilden är att områdets finkorniga jordarter (lera och silt) kan kartläggas med god upplösning då de skiljer sig mot omgivningen som lågresistiva enheter, vanligen 2–60 Ohmm. Dessa över- och underlagras ställvis av sandiga och grusiga avlagringar och ibland av morän.

Bergöverytan går att tolka relativt enkelt i stora delar av urbergsområdet med undantag där det förekommer mycket mäktiga lerlager (ca 30 m). Urberget har vanligen en resistivitet över 300 Ohmm som markant skiljer sig från jordlagrens resistivitet. I berggrunden kan man se ett antal mer eller mindre uthålliga stråk med lägre resistivitet något som pekar på att det finns ett antal sprickzoner inom området (fig. 19). Den låga resistiviteten i dessa zoner kan dels bero på att det finns mer grundvatten än omgivande berggrund men även på en högre lerhalt i sprickorna.

I sydvästra delen av området där kritberggrunden förekommer har gränsen mellan jordlager och kritbergrund och gränsen mellan kritberggrunden och urberg inte kunnat kartläggas. Detta beror på att kritberggrunden har liknande resistivitet som överlagrande jordlager och underlagrande vittrad gnejs.

Mätområde och datakvalitet

Data är i allmänhet av god kvalitet inom området. Djupkänningen för metoden (DOI) varierar men ligger djupare än jorddjupet i nästan hela området. Främst inom de östra delarna av området har en hel del data rensats bort på grund av dålig kvalitet. Bortrensning har framför allt skett i områden där det saknas konduktiva lager, det vill säga där geologin troligen utgörs av torra jordlager eller jordlager med begränsad mäktighet som överlagrar urberg. Större sammanhängande områden med dålig datakvalitet kan därmed indirekt tolkas som områden med avsaknad av mäktiga ler- och siltavlagringar eller ett litet jorddjup. I figur 20 redovisas större sammanhängande områden där data har rensats bort. Dessa områden överensstämmer till stor del bra med vad jordartskartan visar som israndsdeltan (se fig. 16) vilka saknar underliggande lerlager. Dessa jordlager är troligen mestadels torra eller har en begränsad mäktighet i anslutning till moränområdet i öster.



Figur 20. A. Visar flyglinjer och resistivitetsmodeller (blå punkter) B visar jordartskartan. Rosa polygoner visar större sammanhängande område där rådata har rensats bort. Områdena kan till viss del relateras till utbredning av isranddeltan (se fig. 17).
Klusteranalys

Undersökningsområdet Laholm har delats in i fem delområden (Öst 1, Öst 2, Central 1, Central 2, och Väst, fig. 21) för vidare litologisk tolkning. Gränserna för de olika delområdena har gjorts utifrån en klusteranalys i samtolkning med jordarternas fördelning och bildningssätt. Klusteranalysen har begränsats till att jämföra de översta 23 lagren i resistivitetsmodellerna vilket motsvarar ett djup på ca 90 m. Valet av antalet lager baseras på att analysen syftar till att täcka in hela jordlagerföljden i området. Jorddjupet varierar i området men är maximalt ca 80 m. Resultatet från klusteranalysen och delområdesindelning visas i figur 21.

Litologisk tolkning

Inom varje delområde har en analys utförts mellan framtagen resistivitets 3D-voxelmodell och lagerföljdsinformation för klasserna lera och sand/grus. Kvaliteten på analysen beror främst på antalet borrningar som finns inom varje delområde och hur många lager som ingår i klasserna lera och sand/ grus. I tabell 1 redovisas sammanställningen av antal borrningar, antal lager för varje klass samt vilket gränsvärde (fig. 10) som erhållits från analysen. Gränsvärdena för lera ligger nära varandra för alla regioner utom i delområde Väst där det är mycket lägre (10 Ohmm). Även om värdena ligger nära varandra skulle skillnaden som ändå finns göra en stor skillnad för utbredningen av lerlager vid en direkt översättning till en litologisk 3D-voxelmodell för hela området.



Figur 21. Resultatet från klusteranalys (punktdata) och indelningen av fem delområden som baseras på analysen och geologi.

	Öst 1	Öst 2	Central 1	Central 2	Väst
Antal borrningar	66	156	51	116	45
Gränsvärde för lera (<)	55	70	60	60	10
Antal lager i klass lera	30	77	34	95	49
Gränsvärde för sand/grus (>)	55	90	120	60	40
Antal lager i klass sand och grus	117	184	48	125	61

Tabell 1. Sammanställning av analys mellan litologi från borrningar och resistivitet inom de fem delområdena (figur 21).

Mäktiga lerlager under isälvsavlagringar

Jordartskartan 4D Halmstad SO, som täcker större delen av undersökningsområdet, har mer information om jordlagrens utbredning på djupet än vad som vanligen förekommer på SGUs jordartskartor (fig. 22). Här har underliggande lager symboliserats i kartan för att framhäva utbredningen av lerlager i området. Detta har gjorts för att illustrera den komplicerade lagerföljden och för att visa åldersskillnader mellan olika deltabildningar (se avsnitt *Jordarter* under geologisk beskrivning för Laholm). I allmänhet visar jordartskartan endast det översta jordlagret, men här visas alltså även underliggande lager. Avgränsningarna för underliggande lager är främst baserade på borrningar och djupare schakt och är således relativt osäkra.

ATEM-resultaten identifierar tydligt lågresisitiva enheter i nästan hela undersökningsområdet, vilket därmed bekräftar tidigare tolkningar av den underliggande lerans utbredning. Resistivitetsdata gör det nu möjligt att även identifiera geometrin för leravlagringarna. I ett antal områden har det dock identifierats skillnader mellan underliggande lerlager, som de visas på jordartskartan, och lågresistiva skikt identifierade som lera från ATEM-data. Skillnaderna utgörs dels av mindre områden där det saknas ett mäktigt lerlager, och dels av områden där det förekommer mäktiga lerlager men som tidigare inte har klassificerats som sådana (fig. 22)

Områdena längst i väst (A–C)saknar beteckning för underliggande lerlager i den befintliga jordartskartan (fig. 22), då karteringen här (Ringberg 2000) enbart visar de ytnära jordlagren till skillnad från huvuddelen av området (Daniel 2006).

Ett mindre område är identifierat vid Flintarp där utbredningen av underliggande lera sträcker sig längre in mot Hallandsåsen (F). Ett område ligger norr om Lilla Tjärby, precis öster om Lilla Tjärbysjön (D). Här förekommer det lera på ytan i öster och detta lerlager sträcker sig en bit in under isälvsavlagringarna precis väster om denna.

Det största området där en uppdatering av jordartskartan kan utföras finns kring Årnaberga (E), mellan Skogabysjön och Ekasjön. Vid jordartskartläggningen var gränsen mellan det extramarginala deltat och israndsdeltat osäker då få borrningar fanns att basera gränsdragningen på (Daniel 2006). Resistivitetsdata visar tydligt på ett mäktigt (20–25 m) lågresistivt lager under ett 15–20 m mäktigt, mestadels torrt, sandlager. Det lågresistiva lagret motsvarar avlagringar dominerade av lera och silt och gränsen mellan det extramarginala deltat och isälvsdeltat bör alltså flyttas längre österut (fig. 22).

Flera större och mindre områden utan det mäktiga ler- och siltlagret som identifieras i stora delar av undersökningsområdet är markerade med röda polygoner i figur 22. De flesta områden ligger i nära anslutning till andra områden där det är karterat isälvssediment utan underliggande lerlager och indikerar att dessa områden borde utökas något. Det är också möjligt att lera/silt förekommer här men består av mindre mäktiga lager. En möjlig förklaring till mindre områden där resistivitetsdata visar på avsaknad av lågresistiva lager kan vara lokala urbergshöjder där lera inte har avsatts eller senare har eroderats.



Figur 22. Jordartskarta med utpekade områden där denna bör uppdateras efter resultat från ATEM mätningarna. Blåa områden med horisontella blåa streck visar på områden med ler- och siltlager under sand- och grusavlagringar. Lila polygoner visar på område där mäktiga lerlager saknas.

Berggrund och sprickzoner

Sprickor i berggrunden kan vara av intresse ur ett grundvattenperspektiv. I undersökningsområdet i Laholm finns väldigt få blottningar av berggrunden och därmed ont om information om allmänna strukturriktningar. Däremot finns strukturobservationer för berget i närområdet och det kan antas att dessa strukturriktningar är representativa även för berget inom undersökningsområdet då bergarterna tillhör samma sekvens (se avsnitt *Berggrund* under *Geologisk beskrivning* för Laholm).

Inom hela området finns flertalet tolkade deformationszoner, dessa har tolkats från främst geofysiska mätningar (magnetfältsmätningar och Very Low Frequency (VLF)-mätningar, fig. 14, avsnitt*Berggrund* under Laholm). I undersökningsområdet har resistivitetsfördelningen studerats längs dessa tidigare tolkade deformationszoner. För några områden kan dessa deformationszoner också observeras i ATEM-data, antingen som en dal i berggrundsöverytan eller som en lågresistiv zon som fortsätter ner i berggrunden (se avsnitt *3.Sprickzoner i urberg. Exempel Ränneslöv berg*).

Urberget, bestående av gnejs, utgör en högresistiv enhet som begränsar nedträngningen för ATEMsystemet. Urbergets överyta är därför ofta relativt enkelt att avgränsa mot ovanliggande mer lågresistiva jordarter. I området med kritberggrund har ATEM bättre förutsättningar för att upplösa resistivitetsvariationer i denna berggrund. Problem uppstår dock i detta område då kritberggrunden överlagras av mycket mäktiga lerlager som dämpar signalen avsevärt och väldigt lite information kan utläsas från data. Svårigheten består här också i att jordlager, kritberggrund och underliggande vittrad gnejs har väldigt lika resistivitetsvärden och någon tydlig avgränsning mellan dem går inte att observera i den översiktliga analys som har gjorts inom detta projekt.

Bergöveryta och jorddjupsmodell

För huvuddelen av området har berggrundens överyta kunnat identifieras i resistivitetsdata och en ny jorddjupsmodell har producerats (fig. 24A). I den västra delen har en tydlig gräns mellan jord och berg inte kunnat klarläggas då tydliga resistivitetskontraster mellan jord och berg inte har identifierats vilket antas bero på att det här finns så pass mäktiga lerlager att signalen från ATEM dämpas för mycket. I områden med mäktiga lerlager har istället en undre begränsning på lerlagret identifierats, detta är då ett minsta värde på jorddjupet. I figur 24 redovisas den nya jorddjupsmodellen baserad på ATEM-data samt skillnaden mellan denna och den gamla jorddjupsmodellen.

I allmänhet ligger den undre begränsningen av lerlagret ovanför befintlig tolkad bergöveryta och då används den befintliga nivån för bergöveryta. Inom det markerade blå området i figur 24A och i profil i figur 23 befinner sig denna gräns under befintlig jorddjupsmodell. Den undre gränsen baserad på ATEM-data har därför inkluderats som underlag i uppdateringen av jorddjupsmodellen.



Figur 23. Profil som visar uppdatering av jorddjupsmodell i område där den undre begränsningen av lerlagret ligger djupare än befintlig modell för bergöverytan. Profilens lokalisering visas i figur 24 A.



Figur 24. A. Ny jorddjupsmodell baserad på ATEM-data B. Skillnaden mellan den nya och den gamla jorddjupskartan. Det röda området visar var jorddjupsmodellen uppdaterats och den blå polygonen (fig. 24A) visar det område där lerlagrets undre begränsning har använts som indata i den nya jorddjupsmodellen.

Utvalda geologiska miljöer och hydrogeologisk tolkning

I undersökningsområdet finns fyra olika geologiska miljöer som kan vara av särskilt intresse för grundvattenuttag och vattenförsörjning. De olika geologiska miljöerna som finns representerade inom området illustreras i figur 25. Intressanta områden som har avgränsats visas i figur 26, tabell 2. I några delområden finns flera av de intressanta geologiska miljöerna vilket gör dessa extra intressanta för framtida undersökningar. Varje geologisk miljö belyses även mer ingående med ett exempelområde. En kort sammanfattning av fler hydrogeologiskt intressanta områden finns i bilaga 1. De fyra olika geologiska miljöerna är:

1. Sand- och grusavlagringar med stor mäktighet

Jordlagren kan vara helt, delvis eller inte mättade med grundvatten och därav på olika sätt intressanta. Dessa sand- och grusavlagringar, ofta 20–40 m mäktiga, överlagrar oftast lerlager. I vissa fall finns det dock så kallade "fönster" ner till berg, det vill säga sandiga, grusiga sediment från markytan och ända ned till berggrunden. Denna geologiska miljö är intressant då en stor del av grundvattenbildningen sker här och uttagskapaciteten kan vara stor om det finns tillgängligt grundvatten. Om avlagringarna är mestadels torra kan de användas som infiltrationsområden.

2. Sand- och grusavlagringar som underlagrar finkorniga och täta jordarter med stor mäktighet Mäktiga sand- och grusavlagringar förekommer i vissa fall i begravda dalar (sedimentfyllda dalsänkor i jordlagren som döljs av ovanliggande jordlager) och i vissa fall som underjordiska åsar och platåer. Underlag från borrningar visar att denna geologiska miljö är relativt vanlig i stora delar av området. Områden med denna geologiska miljö är intressanta då grundvattnet bör vara väl skyddat mot föroreningar här. Magasinets storlek och nybildning av grundvatten kan vara begränsad. Bäst är förutsättningarna om det finns ett större område med sand- och grusavlagringar eller om det finns ett nybildningsområde (geologisk miljö 1) i anslutning.

3. Sprickzoner i urberg

Sprickzoner har ofta relativt hög porositet vilket gör att vattnet rör sig lättare här. Generellt tenderar dalgångar, ofta med vattendrag, finnas i liknande zoner. Ligger sprickzonerna nära markytan eller står i kontakt med ytvatten genom geologisk miljö 1 finns ofta extra stor potential för grundvattenuttag.

4. Kritberggrund

Denna geologiska miljö finns endast i sydvästra delen av området vid Laholm. För att skilja denna geologiska miljö från omkringliggande jord- och bergenheter krävs en mer ingående analys och troligen kompletterande mätningar och borrningar. Miljön ligger relativt välskyddad mot föroreningar då den till största delen överlagras av lera. Grundvattenbildning sker troligen vid södra sidan (mot Hallandsåsen) där jordlagren är något tunnare samt österifrån, samt via de sand- och grusavlagringar som nämns i geologisk miljö 1. Det är framför allt de översta metrarna av kalksandstenen, där den är som mest permeabel, som är intressant ur grundvattensynpunkt. Liksom vid undersökningsborrningen i Skummeslövsstrand kan de goda uttagsmöjligheterna här bli ännu bättre ifall geologisk miljö 2 är närvarande. I de undre delarna och närmare kusten finns risk för ett salt grundvatten.









Figur 25. Schematisk illustration av de fyra identifierade geologiska typmiljöerna.



Figur 26. Utpekade hydrogeologiskt intressanta områden. Namn och relation till olika geologiska miljöer (figur 25) redovisas i tabell 2.

Tabell 2. Hydrogeologiskt intressanta områden (A-R i
figur 26) och deras koppling till geologisk miljö (figur
25). Områden med kursiverad text presenteras i
rapporten, övriga områden redovisas i bilaga 1.

ID	Område	Geologisk miljö
Α	Tjärby	1,2
В	Veinge	1,2,3
С	Årnabergasjön	1,2
D	Skogabysjön	1,2
Е	Bonnarp	1,2,3
F	Furala	1
G	Lagan Laholm	1,2,3
н	Laholm SO	1,2,3
I .	Edenberga	1,2,(3)
J	Skottorp Vallberga	1,2,4
К	Ränneslöv jord	1,2
L	Ränneslöv berg	3
М	Värestorp	2
Ν	Eskilstorp	1,2,4
0	Rostorp	1,2
Ρ	Hasslöv	1,2,4
Q	Vindarp	1,2,(3)
R	Skummeslövsstrand	4

1. Sand- och grusavlagringar med stor mäktighet. Exempel Årnabergasjö

I området kring Årnabergasjö (fig. 27) finns två av de hydrogeologiskt intressanta miljöerna. Dels finns sand- och grusavlagringar med stor mäktighet som till viss del kan betraktas att utgöra ett fönster och en öppen akvifer (saknar mäktig ovanlagrande lera). Dels finns områden som överlagras av lerlager i en sluten akvifer. Vid borrning 2018 (se fig. 28) uppvisades artesiska förhållanden med en trycknivå några centimeter ovan markyta vilket stödjer denna tolkning. Vid borrning och rörsättning utfördes en kortare provpumpning. Bedömningen är att magasinet har god till mycket god hydraulisk konduktivitet och möjligt grundvattenuttag bedöms till mer än 25 l/s.

Nybildning av grundvatten tolkas primärt ske i isälvmaterialet i norra delen av området som även ligger högst i topografin (fig. 27B). Här finns även en bäck (rinner från norr mot söder) som skurit ned i en ravin. Det är inte otänkbart att infiltration sker någonstans längs bäcken. I höjd med borrningen och längs Lillån som kommer österifrån finns finkornigare svämsediment som överlagrar akviferen. Det finns även en dal i berggrunden i ungefär nord–sydlig riktning (fig. 28) som eventuellt hjälper till att koncentrera ansamlingen av grundvatten till en avgränsad enhet. Det finns en möjlighet att dalen fortsätter söderut in i området Bonnarp (se bilaga 1).

Årnabergasjön ligger med en tät botten på den permeabla sanden. Borrningar söder om sjön visar på uppemot 40 m mäktiga sand- och grusavlagringar, utan något lerlager, med en grundvattenyta på ca 10 m under markytan. Det finns således både en relativt mäktig omättad zon och en mäktig mättad zon från vilken man bör kunna göra större grundvattenuttag. Den mäktiga omättade zonen gör det också till ett intressant område för infiltration av ytvatten för att öka mängden uttagbart grundvatten. Området är möjligt att använda som infiltrationsområde för att förstärka uttagskapaciteten i grundvattenmagasinet.



Figur 27. Utbredning av det intressanta området Årnaberga i typografisk (A) och jordartsgeologisk (B) kontext.



Figur 28 . Profil inom området Årnabergasjö. Profilens läge visas i figur 27 A.

2. Sand- och grusavlagringar som underlagrar finkorniga och täta jordarter med stor mäktighet. Exempel Värestorp

Vid Värestorp, (fig. 29A), ca 2 km söder om byn Ränneslöv, finns vad som tolkas som mäktiga sandoch grusavlagringar under mäktiga lerlager. Jordlagren har en tolkad mäktighet på uppemot 50 m varav de översta 15–20 m tolkas bestå av lera och finkorniga sediment (fig. 30). Sand- och grusavlagringarna tolkas ligga i en sänka i urberget (fig. 30).



Figur 29 A Karta som visar utbredning av det intressanta området Värestorp samt den borrning som diskuteras i texten. B Området Värestorp med jordartskartan som underlag, blått streckat område i figuren visar på områden där trolig grundvattenbildning till akvifereren sker.



Figur 30. Profil inom området Värestorp. Profilen går från väster till öster och läget visas i figur 29A–B.

SGU utförde en borrning (se fig. 29) i de centrala delarna av den tolkade begravda dalen där störst mäktighet av grundvattenmättad sand och grus tolkats in. Borrningen avslutades på 12 meters djup då borren troligen gick på större block i morän, och den förmodade slutna akviferen nåddes alltså inte (fig. 30). De borrningar som finns i närområdet ger ingen hjälp i tolkningen då dessa finns i områden med mindre jorddjup. Det kan också vara fråga om morän som ligger i sänkan då moränen har en liknande resistivitet som sand och grus i området.

Det mäktiga lerlagret utgör ett bra skydd mot föroreningar vilket gör området extra intressant om det finns en akvifer här. Områdets måttliga storlek är en begränsande faktor och nybildningen av grundvatten kan vara långsam tack vare de täta överliggande jordlagren. Flera av de närliggande brunnnarna har lerlager i lagerföljden. Det kan dock finnas nybildningsområden i de isälvsavlagringar som finns i höjdområden öster om Värestorp (fig. 29B).

3. Sprickzoner i urberg. Exempel Ränneslöv berg

Strax väster om Ränneslöv ligger ett intressant område, Ränneslöv berg, i nord–sydlig riktning (fig. 31) där det finns ett flertal resistivitetsanomalier i data som kan tolkas utgöra sprickzoner i berggrunden. Jordlagren är mäktiga, 30–70 m, och består till stora delar av lågresistiva finkorniga jordarter.



Figur 31. Karta över området kring Ränneslöv berg med tidigare tolkade sprickzoner.



Figur 32. Profil inom området Ränneslöv berg. Profilens läge visas i figur 31.

I figur 32 visas en profil inom Ränneslöv berg där det identifieras dalar i berggrunden som tros vara kopplade till sprickor i berggrunden. De tolkade sprickzonerna i resistivitetsdata överensstämmer delvis med tidigare tolkning av sprickzon från magnetfältsdata i området.

Inom Ränneslöv berg ligger ett intressant område i jordlagren, som benämns Ränneslöv jord (se bilaga 1). Här finns sand- och grusavlagringar (isälvsmaterial) av stor mäktighet (25–30 m) från ytan ner till berget och här sker troligen delar av nybildningen av det grundvatten som finns i sprickzoner inom det utpekade området.

Lagerföljder från brunnar visar att det både förekommer och saknas sand- och grusavlagringar under det mäktiga lerlagret. En mer detaljerad analys av utbredning av dalar och sprickzoner samt förekomst av underliggande sand- och grusavlagringar kan visa ifall området är intressant för vattenförsörjningsändamål.

4. Kritberggrund. Exempel Skummeslövsstrand

Denna geologiska miljö finns endast i sydvästra delen av undersökningsområdet Laholm och exemplifieras med området nära Skummeslövsstrand. Utbredning och mäktighet av kritberggrunden har avgränsats med hjälp av brunnsdata (fig. 33B). Detta är en mycket grov uppskattning som baseras på de borrningar som finns och den geologiska kunskapen om hur kritberggrunden har bildats. (fig. 33A). Området med kritberggrund täcker en area på ca 36 km². Den uppskattas ha en medelmäktighet på 35 m där den är som mäktigast i sydväst och som tunnast i nordost (fig. 33B). Volymen för hela enheten är ca 1,2 km³ (fig. 34).

Under augusti 2018 genomfördes en ca 104 m djup kombinerad hammar- och kärnborrning för att undersöka jordlagren och kritberggrunden. Syftet var att använda informationen som stöd till tolkningen av ATEM-mätningarna och att bedöma grundvattenförhållandena i området. Urskiljning av kritberggrund har inte kunnat göras utifrån ATEM-data och tolkning av denna geologiska miljö baseras främst på befintliga data och på den borrning som utfördes inom projektet.

Genom jordlagren och ner i den övre okonsoliderade delen av berggrunden borrades ett hammarborrhål. Borrningen avslutades på 54 m djup och ett foderrör cementerades i den övre delen av berggrunden. I samband med hammarborrningen togs prov av borrkaxet var femte meter. Den nedre delen av borrhålet utfördes som en kärnborrning av Lunds Tekniska Högskola (LTH) (Riksriggen). Borrningen avslutades på 103,94 m, tre meter ner i ovittrad gnejs. Efter avslutad borrning genomförde LTH på uppdrag av SGU en geofysik borrhålsloggning med mätning av naturlig gammastrålning, resistivitet och konduktivitet (fig. 35).

Kaxprovtagningen visar att jordlagren domineras av lera, lerig morän och moränlera förutom ett parti med finsand överst och ett par meter mäktigt något grövre sandlager (mellansand) ovanpå berggrunden (fig. 35). De understa kaxproven består av en ljusgrå siltig finsandig kalkarenit. Berggrundsytan bedöms utifrån loggar och kaxprov ligga på 47 meters djup (fig. 35). I den hammarborrade sektionen är det dock svårt att exakt ange djupnivåerna för de olika geologiska lagren.

Kärnborrningen visar på förekomst av en ca 10 m mäktig sekvens med glaukonitsand (fig. 36A) som överlagrar rödgrå gnejs på 101 meters djup. Ovanför glaukonitsanden följer drygt 35 m tät, mörkgrå märgelsten med ett flertal uppemot en meter mäktiga oregelbundna ljusgrå partier med förkislad kalksten och flinta (fig. 36B). Övre delen av berggrunden består av uppåt successivt sandigare, lösare och porösare kalksten (fig. 36C). Biostratigrafiska analyser utfärdade av GEUS (Danmarks och Grönlands geologiska undersökning) visar att hela den sedimentära berggrunden är av campan ålder.

I samband med hammarborrningen (fig. 35) noterades vattenflöden på 12 000 l/tim mellan 44 och 54 meters djup vilket motsvarar undre delen av jordlagren (mellansand) och övre delen av berggrunden (siltig finsandig kalkarenit). Under detta parti, ner till toppen av glaukonitsanden på 92 m, är berggrunden tät och inga inflöden av vatten noterades. Vid 72,5 meters djup förekommer ett cirka en meter mäktigt lager med kraftigt förkislad kalksten och flinta som tycks utgöra en horisontell hydraulisk barriär. Under denna nivå är den elektriska ledningsförmågan (vätskekonduktiviteten) markant högre samtidigt som resistiviteten sjunker (fig. 35). Detta tolkas som nivån för salt porvatten i berggrunden. När glaukonitsanden genomborrades noterades en del spolförluster vilket indikerar att sanden, trots att den är porös och permeabel, inte är någon betydande akvifer i området. Även om så skulle vara fallet ligger den under den tolkade nivån för salt grundvatten.

I hela utbredningsområdet för kritberggrund är det troligt att det både finns delområden med och utan en övre permeabel del av berggrunden som i borrningen vid Skummeslövsstrand. Baserat på ett antal borrningar och kommunala uttag i området är det dock troligt att det finns ett relativt mäktigt sand- och grusavlagringar som överlagrar denna enhet. I dessa fall samspelar de till en gemensam akvifer. I de västra delarna är det troligt att båda dessa grundvattenförande enheter riskerar att ha, eller vid stora uttag få, ett saltpåverkat grundvatten. En grundlig kartläggning av akviferens utbredning såväl vertikalt som horisontellt skulle dock sannolikt visa på att uttagen ändå kan ökas väsentligt jämfört mot dagens uttag. Då stora delar täcks av mäktiga lerlager är även akviferen relativt skyddad mot föroreningar ovanifrån.

Nybildningsområde för det grundvatten som finns i akviferen ligger troligen delvis i de östra delarna, mäktiga sand- och grusavlagringar på berg, vid Hallandsåsens sluttning, samt i mindre områden med fönster inom kalkstenens utbredning, Det finns både borrningar och ATEM-data som tyder på förekomst av fönster inom de utpekade områdena Eskilstorp, Hasslöv, Skottorp och Rostorp (fig. 26, se även bilaga 1).



Figur 33. A. Utbredning av kritberggrund samt uttagskapacitet från brunnsborrningar. B. Tolkad mäktighet av kritberggrund samt mäktighetsuppgifter för kritberggrund från borrningar.



Figur 34. Geologisk 3D-voxelmodell över kritberggrunden samt möjliga nybildningsområden för grundvatten utmärkta med svarta pilar.



Figur 35. Litologisk logg av borrningen och borrkärnan vid Skummeslövstrand, resultat från geofysik borrhålsloggning med mätning av naturlig gammastrålning, resistivitet och konduktivitet, samt information om vattenförande zoner.



Figur 36. Foton som illustrerar borrkärnans utseende på olika djup. A. Medel- och finkornig, fossilrik grönsand med varierande hårdhet, porositet och karbonathalt (95–100 m djup). B. Exempel på de gråspräckliga hårda och täta lager med förkislad kalksten och flinta som förekommer i den märgelstensdominerade lagerserien mellan 68 och 85 m djup. C. Uppsprucken och porös, ljusgrå kvartsrik biokalkarenit som överlagrar grå lerig kalksten och märgelsten i den övre delen av berggrunden (54–62,24 m djup).

FALKENBERG

Undersökningsområdet Falkenberg ligger centralt i kommunen, till största delen under nivån för högsta kustlinjen (ca 65 m ö.h., fig. 37). Området karakteriseras av en kuperad topografi, med tydliga dalgångar i nordnordostlig–sydsydvästlig riktning (fig. 37). Området är ungefär 150 km² och markanvändningen består av åkermark till ca 80 procent. Området är utvalt för att det förekommer betydande sand- och grusavlagringar både i markytan och på djupet som är täckta av lera. En kartläggning av områdets jordarter kan vara av stor vikt för vattenförsörjningen i regionen. Ett antal kommunala vattentäkter finns redan idag inom området. Då jordlagren i Falkenbergsområdet underlagras av gnejs innebär undersökningen också en test av själva undersökningsmetoden för denna typ av miljö.



Figur 37. A. Översiktskarta med markanvändning inom undersökningsområdet (lila polygon) i Falkenberg. B. Markytans topografi inom undersökningsområdet. Högsta kustlinjen visas med svart polygon.

Geologisk beskrivning

Berggrund

Inom Falkenbergs undersökningsområde utgörs berggrundens morfologi av ett spricklandskap som framför allt har påverkats av utvecklingen under mesozoikum, en geologisk era för ca 252–66 miljoner år sedan (Lidmar-Bergström 1998). Berget är kluvet i sprickdalar som följer ett relativt tydligt mönster (fig. 38). Centralt i området ligger Ätrans dalgång som är orienterad nordnordost–sydsydväst. I området finns även sprickdalar som är orienterade nordnordväst–sydsydost.

Berggrunden inom undersökningsområdet är kraftigt deformerad och omkristalliserad under höga tryck och temperaturer. Den domineras av ådergnejser (fig. 38) som har sitt ursprung i granitiska och



Figur 38. Berggrundskarta över Falkensbergsområdet baserad på SGUs berggrundsgeologiska kartdatabas (SGU, 2019: Berggrund 1:50 000 - 1:250 000, centrala Halland).

granitlika bergarter (Andersson m.fl. 2019). Andra framträdande bergartsled är stråk med granatrik ofta ådergnejsomvandlad gabbro (granatamfibolit och mafisk granulit) och en veckad skiva med kraftigt omvandlade yt- och djupbergarter med avvikande kemiska, magnetiska och mineralogiska egenskaper (fig. 38, Obbhult-Steningeenheten, Andersson m.fl. 2019). I det senare stråket uppträder även mindre kroppar av ögongnejs av samma typ som dominerar i Varbergsområdet (Varbergscharnockit och Torpagranit).

De strukturellt yngsta bergarterna är gångar av diabas, pegmatit och granit som helt eller delvis klipper sidognejsens struktur. De strukturellt unga diabaserna är också metamorft omkristalliserade. De strukturellt sena gångarna är på många lokaler nord–sydligt till nord–nordöstligt orienterade.

Det plastiska deformationsmönstret kännetecknas av veckning och sträckning längs öst-västligt orienterade veckaxlar som överpräglas av storskalig upprättstående öppen veckning längs nord-sydliga axlar. I undersökningsområdet dominerar ett nordnordostligt deformationsstråk som utgör en skänkel av ett storskaligt nord-sydligt veck.

Spröda deformationsstrukturer i området har inte kartlagts systematiskt av SGU. Samtolkning av fältobservationer, lineamentsdata, geofysiska data och höjddata i regionen indikerar två huvudtrender i det spröda deformationsmönstret. Den i häll vanligast förekommande sprick- och förkastningsorienteringen är nordnordöstlig, med brant till nästan vertikal stupning. I områden där berggrunden är väl blottad kan de nordnordöstliga sprickorna ofta följas flera meter, ibland längre. Det nordnordöstliga spricksystemet är troligtvis relaterat till det storskaliga nordsydliga till nordnordöstliga sprick- och förkastningssystemet som kopplas till Vätternsänkan. Reaktivering av detta prekambriska spricksystem har föreslagits äga rum ända fram till tidig holocen (Jakobsson m. fl. 2014).

Västnordvästliga sprick- och förkastningsorienteringar har sällan dokumenterats vid fältkartläggningar i området. Den mest framträdande förkastningszonen inom området löper dock i denna riktning. Zonen löper parallellt med kusten i västnordvästlig riktning, i stort längs E6 (fig. 38). Den framträder tydligt i VLF- och höjddata samt magnetiska data. I samtolkning med hälldata har förkastningen i berggrundskartan tolkats som en dextral förskjutning av berggrunden, sannolikt även med en relaterad signifikant vertikalförskjutning. De västnordvästliga förkastningszonerna är parallella med Tornqvist–Sorgenfreizonen i Skåne (se till exempel Bergerat m. fl. 2007). Områden där de framträder tydligt sammanfaller med förändringar i landskapet, lägre topografi, ett djupare jordtäcke och markant färre sjöar.

Jordarter

Inom Falkenbergsområdet finns flera typer av isälvsformer representerade förutom åsar som är ovanliga under högsta kustlinjen (HK) i Halland. Cirka 10 procent av undersökningsområdets landyta utgörs av isälvssediment (fig. 39). En uppskattning är att en lika stor yta med isälvssediment är täckt av yngre sediment, som till exempel glacial lera och postglaciala sediment. I Hallands dalgångar och i gränszonen mellan kustslätt och höjdområde förekommer ett flertal stora isälvsavlagringar (Engdahl m.fl. 1994), så också inom undersökningsområdet. Jordlagren avsattes framför allt under den senaste istiden, Weichselistiden, och den efterföljande postglaciala tiden. Landisen smälte av från Falkenbergsområdet för ca 16 000 år sedan (fig. 40). Landet var då nedpressat under isens tyngd och området låg under vatten när isen försvann. Jordarternas utbredning i området (fig. 39) redovisas i jordartskartorna Varberg SO/Ullared SV (Påsse 1988) och Ullared NV (Engdahl 2011).

I Högvadsåns och Ätrans dalgångar, norr och söder om Ätraforsdammen, finns flera stora isälvsavlagringar. Isälvsavlagringarna bildades innan och under den paleogeografiska miljö som visas i figur 40A. Mäktigheten är som mest ca 50 m och lera kan förekomma i de distala delarna av respektive avlagring. Norr om Askome bildar isälvssedimenten deltan, terrasser och kullar. Isälvsavlagringarna är inte sammanhängande i markytan i den södra delen av det här området, utan omges och överlagras av lera och postglacial sand. På flera ställen i dalgången finns lagerföljdsuppgifter, som visar att det finns relativt mäktiga lager av grus och sand under leran. Man kan därmed förmoda att det finns ett mer sammanhängande lager av grus och sand under leran i hela den här delen av dalgången. Cirka två kilometer nordnordost om Trustorpsgård och cirka två kilometer nordnordväst om Askome kyrka finns två efterbehandlade grustag, men i övrigt är isälvssedimenten orörda i dessa delar av Högvadsåns och Ätrans dalgångar.



Figur 39. Jordartskarta över undersökningsområdet Falkenberg.

Runt Vessigebro finns flera stora grusavlagringar med stenigt grus. Mäktigheten kan vara upp till ca 70 m. Lager och skikt av lera förekommer i dessa isälvssediment. Ca 5 km söder om Vessigebro, öster om Ätran finns flera stora isälvavlagringar där täktverksamhet bedrivits. Avlagringarna gränsar i öster till berg och morän. Täktverksamheten är i stort avslutad och täkterna är delvis efterbehandlade. Stenigt grus var vanligt i grustäkterna.

Väster och norr om Årstad kyrka finns en grusavlagring med växlande innehåll, oftast sand och grus i växellagring. Ibland förekommer också kärnor av stenigt grus. På kustslätten finns några små isälvsavlagringar som är omgivna av lera och postglacial sand. Några ligger i anslutning till berg i dagen och förmodas därför vara små och lokala.

Älv- och svämsediment har bildats och bildas fortfarande (fig. 40 C–D) utmed vattendrag och som deltan i sjöar och hav vid vattendragens mynning. I området förekommer svämsediment framför allt längs Ätran, Suseån och Högvadsån. Svämsedimentens sammansättning växlar i både vertikal- och horisontalled, men finsand är dominerande fraktionen längs dessa vattendrag. Cirka fem procent av området består av svämsediment. Älvsediment, i form av grus, är sällan förekommande i Västsveriges dalgångar, men har i kartområdet påträffats längs Ätran söder om Ätrafors. Mäktigheten på gruset, som underlagras av lera, är 1–5 meter.

Svallgrus och postglacial sand täcker ca 15 procent av kartområdets yta (fig. 39). Svallsedimenten påträffas ofta i direkt anslutning till isälvssediment eller morän och bildades under den paleogeografiska miljö som visas i figur 40A–C. På flera ställen underlagras svallsedimenten av lera. Mäktigheten på sanden och gruset är vanligtvis 1–3 m. Söder om Svartrå kyrka, vid nivån ca 50 m ö.h., finns en stor flack avlagring med grusig sand. Den grusiga sanden, som har mäktighet på 2–5 m, underlagras av lera med en mäktighet av ca 30 m. Under leran påträffas grus och sand. Den grusiga sanden i markytan förmodas vara postglacial, men det kan inte helt uteslutas att den bildats i ett issjöstadium vid en lokal framryckning av isen. En sådan framryckning av isen har konstaterats i angränsande områden (Påsse 1988).

Finsanden på Hallands kustslätt är bildad som distala svallsediment men genom havsströmmars inverkan i de dåvarande fjordarna har den ställvis transporterats längs botten och avsatts på djupare vatten. Delar av den här sanden är, efter att den kom ovanför havsytan, utsatt för vinderosion och har bildat flygsandsområden, till exempel vid Suseån och längs havsstranden vid Suseåns utlopp i havet.

Glacial sand förekommer framför allt i randzonen mellan kustslätt och höjdområde och i anslutning till stora isälvsavlagringar. Mäktigheten är vanligen 2–7 m och jordarten överlagrar glacial lera. Sanden har bildats i strömmande vatten och en skiktning förekommer. Vissa skikt kan bestå av silt och lera. Den glaciala sanden har bildats under ett issjöstadium (Påsse 1988).

I området påträffas glacial lera upp till nivåer runt ca 55 m ö.h. i Högvadsåns och Ätrans dalgångar (fig. 40A–B). Lermarkens yta avspeglar delvis den underliggande berggrundens topografi. Branta sluttningar har dock skapats genom erosion i leran längs vattendragen och dessa ytformer beror inte på den underliggande berggrundens relief. I dalgångarna under HK är ca 25 procent av jordarten i markytan lera (fig. 39). Nästan all postglacial sand och delar av svallgruset underlagras av lera, varför den egentliga utbredningen av leran är betydligt större. Stora lerdjup, mer än 50 m, finns i Ätrans dalgång. Lerhalten i den glacial leran är 20–50 procent och leran är grå till gråbrun och har en karbonathalt mellan 0 och 4 procent (Påsse 1988).

Moräntäcket kan vara uppbyggt av lager avsatta under olika faser av den senaste istiden eller mer sällsynt av en tidigare istid. Normalt vilar moränen direkt på berggrunden och avsattes före och under den paleogeografiska miljön i figur 40A, men det förekommer att den överlagrar äldre sorterade sediment eller vittringsjord. Vanligen ligger moräntäcket mer eller mindre "utsmetat" på underlaget och utjämnar delvis ojämnheter i underlaget. Mäktigheten på moränen i sådana områden är 1–5 m. Jordmäktigheter på 30–40 m finns i områdets stora moränackumulationer (enligt uppgifter från SGUs brunnsarkiv). Den totala arealen av morän är cirka åtta procent i området.



Figur 40. Områdets paleogeografiska utveckling. A. för 15 200 år sedan. B. för 13 700 år sedan. C. för 6 000 år sedan. D. nutid. Dagens strandlinje är markerad med röd linje.

Drumliner och läsidesmoräner är strömlinjeformade, i regel svagt välvda ryggar, som är orienterade längs isrörelseriktningen. Ibland förekommer en kärna av berg i drumlinerna. Läsidesmoräner har avsatts "i lä" av uppstickande berg, det vill säga på den sidan av berget som ligger i ett skyddat läge för isrörelsen. Gemensamt för dessa former är att de har bildats under en bottensmältande is i rörelse. De flesta drumliner inom området har en sydvästlig–nordöstlig riktning. Jordarten i en drumlin är oftast komplex, med både morän, sorterade grov- och finkorniga sediment. Den mest välformade är drumlinen är Skreadrumlinen, nordöst om Skrea kyrka. Det är troligen drumlinen som har som gjort att Ätran någon gång bytt flödesriktning och idag viker av väster ut istället för att fortsätta ut till havet i sydvästlig riktning. Skreadrumlinen har en mäktighet på ca 40 m som mest och har en komplex sammansättning. Hela drumlinen är täckt av svallsand och svallgrus med varierande mäktighet men säkert finns det områden med ca 5 m med sorterade jordarter ovanpå moränen. Moränen är i regel siltig– sandig med skikt (upp till någon decimeter) och lager (några metrar) med sand och grus men även lera kan förekomma. Det saknas dock fullständig kunskap om Skreadrumlinen.

Moränen inom kartområdet är huvudsakligen sandig. Det är inte ovanligt att moränen innehåller sliror av sorterade sediment men att den ändå är kompakt. Grusig morän har påträffats på några ställen, främst invid områden med steniga och blockiga isälvsavlagringar.

Tunt eller osammanhängande jordtäcke på berggrunden och berg i dagen har en begränsad utbredning i området, endast 7 procent av ytan. Det tunna jordtäcket utgörs vanligen av morän. Tunt moräntäcke på berg förekommer främst i terräng som ligger relativt högt eller på stora flacka bergsområden.

Hydrogeologiska förhållanden och vattenförsörjning

Grundvattenmagasin i jordlagren och berggrund

Grundvatten i jord inom flygområdet förekommer framför allt i isälvsavlagringar bestående av sand och grus. Dessa är i varierande grad täckta av finkorniga sediment, lera eller silt. En översiktlig länstäckande kartläggning av grundvatten i jord utfördes av SGU (Karlqvist m.fl. 1985). Kring år 2011 fanns det ett behov av att inom vattenförvaltningen inkludera de grundvattentillgångar som finns inom flygområdet. Orsaken var att när vattenförvaltningen några år tidigare sjösattes ingick inte dessa tillgångar bland landets grundvattenförekomster som rapporterats till EU. SGU gjorde därför en mycket översiktlig bedömning och geografisk avgränsning av ett antal grundvattenmagasin i isälvsavlagringar inom Falkenbergs och Varbergs kommuner, bland annat inom flygområdet (fig. 41). Avgränsningarna baserades förutom på geologisk bedömning främst på information från borrningar, brunnar samt några hydrogeologiska utredningar. I det flesta områden var det befintliga underlaget mycket begränsat och därmed krävdes översiktliga bedömningar för att utföra avgränsningarna.

Övergripande kan grundvattenmagasinen inom flygområdet indelas i två kategorier utifrån förhållandena vid bildningen av jordarterna i området och gränsen för högsta kustlinjen, (ca 65 m ö.h. i kommunen).

På nivån för högsta kustlinjen finns ett flertal isälvsavlagringar uppbyggda som delta eller av annan randbildningskaraktär (fig. 39). Det har bedömts att kvarvarande isblock har bidragit till topografin och avsättning av grövre sediment. Generellt kan det vara svårt att utan borrningar säkerställa vad de marknära sandavsättningarna har för ursprung. Det kan eventuellt också, i samband med uppehåll och framryckning av isen i avsmältningsskedet, avsättas finkorniga sediment i dessa bildningar. Då lager av sand och grus ofta fortsätter på lägre nivåer ut från delta och randbildningarna så är det vanligt att de föreslagna magasinen innefattar volymer under HK och där täckande finsediment är vanliga. Sammantaget medför det att de komplexa jordartsförhållandena kan innebära begränsningar i den hydrauliska kontakten mellan sand- och grusavsättningar inom de föreslagna magasinen (fig. 41) och i vissa delar begränsad grundvattenbildning genom täckande finsediment. En förstärkande faktor till svårigheten att bedöma grundvattenförhållandena inom respektive magasin är den markerade berggrundstopografin som råder inom hela kommunen. Grundvattenmagasin som kan anses ha denna karaktär inom flygområdet är Okome (A), Vessigebro (B) och Sörby (C) (fig. 41).

I kustlandskapet och i kommunens centrala dalgångar täcks huvuddelen av isälvsavlagringarna av finkorniga sediment, främst lera, som i sin tur ofta överlagras av sand (fig. 39). Mycket stora variationer i jorddjup och förekomst av berg i dagen även i dessa delar talar för en stor variation i berggrundstopografin. Avsättningen av isälvsavlagringarna i samband med isavsmältningen ovan berget kunde variera mycket lokalt. Därefter avsattes lera som kan variera från noll upp till ett sextiotal meter i mäktighet. Sand av glacialt ursprung (ljusgrön färg på jordartskartan) samt av svallsandskaraktär (orange färg) täcker ofta leran och kan vara flera meter mäktig, men är oftast endast några få meter (fig. 39). De grundvattenmagasin som tillhör denna kategori inom flygområdet är Kärreberg (D), Vinberg (E) och Heberg (F)(fig. 41).



Figur 41. Namngivna grundvattenförekomster, A – Okome, B – Vessingebro, C – Sörby, D – Kärrenerg, E – Vinberg och F – Heberg samt fastställda vattenskyddsområden inom undersökningsområdet.

Inom flygområdet förekommer flera källor med varierade flöden. De återfinns i Ätrans och Högevadsåns dalgångar och kommer där sand och grus underlagrar finkornigare lager i form av leror. Grundvatten tränger fram i sluttningar eller i områden där det täta ovanliggande lagret är mindre mäktigt.

I stora delar av det undersökta området utgörs berggrunden av gnejs, uttagsmöjligheten är generellt sett god till måttlig, brunnar för enskild vattenförsörjning ger mellan 500 och 2 000 l/tim inom området. Brunnar för enskild vattenförsörjning är ofta mellan 60 och 100 m djupa.

Vattenförsörjning

Huvudvattentäkten för Falkenbergs vattenförsörjning baseras på brunnar nedförda i jord belägna vid Kärrebergs vattentäkt. Råvattenuttaget är ca 6 900 m³/dygn. Vid vattentäkten sker konstgjord grundvattenbildning med vatten från Ätran, den är i samma storleksordning som uttaget ur brunnarna. Vattentäkten har dock ett tillstånd som medger grundvattenuttag på 18 000 m³/dygn och infiltration av 20 000 m³/dygn. Falkenbergs kommun har även en vattentäkt i Sörby som försörjer orterna Årstad och Heberg med grundvatten. Uttaget är nu knappt 1 000 m³/dygn, men täkten har tillstånd till större uttag (8 600 m³/dygn) samt tillstånd till bortledning av ytvatten från Ätran för infiltration. För tillfället sker ingen infiltration i vattentäkten i Sörby. Söder om Vinbergs kyrkby, sker uttag om ca 540 m³/dygn (2004) för industriändamål. I Vinåns dalgång finns en äldre vattentäkt som tidigare försörjt Falkenberg, den är numera reservvattentäkt. Vattentäkten kan förstärkas med konstgjord grundvattenbildning från Vinån. I Vessigebro finns en vattentäkt i sand och grus under lera som försörjer Vessigebro samhälle där uttaget är ca 100 m³/dygn. Även i Okome finns en mindre vattentäkt baserad både på brunnar i jord och berg.

Den enskilda vattenförsörjningen inom flygområdet vid Falkenberg baseras i huvudsak på egna brunnar, antingen grävda i jordlagren eller borrade brunnar. De grävda brunnarna är i allmänhet nedförda i den ytliga svallsanden, ofta kan tillgången vara tillräcklig för enskild vattenförsörjning. Det finns en viss risk för förhöjda kloridhalter i bergborrade brunnar som ligger lågt och/eller kustnära.

Resultat och områdesspecifika tolkningar

Resultaten presenteras som en översiktlig litologisk tolkning baserad på resistivitetsdata, lagerföljdsinformation och jordartsfördelning och som en hydrogeologisk tolkning med fokus på intressanta områden ur ett vattenförsörjningsperspektiv.

Kartläggningen av jordarter och jorddjup i Falkenberg har främst resulterat i en god kartläggning av jorddjup samt utbredningen av mäktiga underlagrande lerlager. Förekomsten av mäktiga lerlager i Ätrans dalgång har tidigare varit kända (se avsnitt *Jordarter* under *Geologisk beskrivning* för Falkenberg), men inte dess egentliga utbredning i 3D. Tolkning av bergöverytans nivå har genomförts med gott resultat och en uppdatering av SGUs rikstäckande jorddjupsmodell kommer att ske.

Berggrunden i området, som består av gnejs, har i de flesta fall en hög resistivitet (vanligen över 300 Ohmm. I flertalet intilliggande mätprofiler syns ett antal områden med lägre (vanligen 30–80 Ohmm) resistivitet. I de fall där anomalierna återkommer i flera profiler med någon form av regelbundenhet har detta tolkats som sprick- eller svaghetszoner (fig. 42). Den låga resistiviteten i dessa zoner kan dels bero på mer grundvatten i sprickzonerna än kringliggande berggrund men även på en högre lerhalt.

De ytliga jordlagren (översta 5 m) består till ungefär lika delar av leriga finkorniga sediment (vanligen 2–30 Ohmm, fig. 42) och sandiga sediment (vanligen 100–300 Ohmm, fig. 42). De mäktiga lerlagren underlagras ställvis av mättade sandiga lager med resistivitet omkring 30–80 Ohmm, fig. 42. Resistivitetsintervallen för olika litologier överlappar ofta varandra vilket gör gränsdragningen mellan olika lager svår. Många av de avlagringar som är intressanta ur grundvattenperspektiv överlagras av lågresistivt finmaterial av sådan mäktighet att det stör signalen för mycket för att kunna få en helt trovärdig resistivitetsmodell för mätpunkten. Detta gäller stora delar av Ätrans dalgång.

Det går i viss mån att urskilja sandavlagringar i markytan av intressant mäktighet avseende dricksvatten. Företrädesvis finns dessa i norra delen av undersökt område och i randen strax under högsta kustlinjen, vilket korresponderar väl med tidigare beskrivning av jordarter och grundvattenmagasin inom området.

På grund av beskrivna tolkningsproblem har det inom ramen för detta projekt inte uppförts någon fullständig geologisk 3D-voxelmodell för hela området. Resultaten redovisas istället i form av en visualisering av utbredningen av de mäktiga lerlagerna och tolkning längs profiler.



Figur 42. Profil från Falkenbergsområdet med resistivitetsdata och tolkade jord och berglager. Profilen går från Vessigebro i NNO (vänster i profilen) till Stoagård i SSV (höger i profilen). Se figur 43 för lokalisering.

Mätområde och datakvalitet

Data är generellt av god kvalitet inom området. Djupkänningen för metoden (DOI) varierar men är djupare än jorddjupet i nästan hela området. Bortrensning av data sker i områden där det saknas konduktiva lager, det vill säga där geologin troligen utgörs av torra jordlager eller jordlager med begränsad mäktighet som överlagrar urberg. Större sammanhängande områden med dålig datakvalitet kan därmed indirekt tolkas som områden med avsaknad av mäktiga ler- och siltlager eller ett litet jorddjup. I figur 43 redovisas flyglinjerna för ATEM mätningen tillsammans med de punkter där trovärdiga resistivitetsmodeller finns. Det är i huvudsak inom områden med hällar och ytligt berg som större områden blivit bortrensade.

Klusteranalys

Klusteranalysen för Falkenbergsområdet visade tydligast mönster då data delades in tre klasser och de 28 översta lagren från resistivitetsmodellerna inkluderades i analysen, se figur 44A. Parallellt gjordes även en analys (baserad på litologisk tolkning) av utbredningen av den underliggande leran, se figur 44B. I princip avbildar mönstret från klusteranalysen den tolkade utbredningen av lera, (fig. 44A–B). Tolkning av lerans mäktighet gjordes genom att välja ut alla lager i respektive resistivitetsmodell som har beräknad resistivitet 0–20 Ohmm. Dessa klassificerades som lera och färgskalan visar lagermäktigheten. Jämförs karteringen av lerans utbredning från ATEM-data mot lerlager från faktiska lagerföljdsdata från borrningar inom området överensstämmer den väl med tolkningen från resistivitetsdata, (fig. 44B–C).

Man bör reflektera över antal lager som är inkluderade i klusteranalysen. Resistivitetsmodellerna är som nämnts tidigare indelade i 30 lager med ökande mäktighet mot djupet. Lagren utgår från markytan vilket innebär att topp- och bottennivå för varje lager varierar mellan alla mätpunkter. Om modellangivna nivåer räknas om till korrekt plushöjd så motsvarar botten på det tjugoåttonde lagret ungefär en nivå på -500 m ö.h. Enligt tidigare resonemang bör alltså inte ATEM-data på så stort djup betraktas som tillförlitligt.

Då klusteranalyser gjordes enbart med mer ytliga lager i modellen som teoretiskt bättre skulle motsvara att endast titta på marklagren återgavs inte lika tydliga mönster och det gick inte att koppla mönstret till någon geologisk struktur. Inte heller analyser med alla 30 lager fick lika tydliga mönster som vid just analys med de 28 översta lagren.



Figur 43. Flyglinjer längs vilka data har samlats in samt resistivitetsmodeller (blå markeringar). Lokalisering av profil i figur 42 visas med orange linje.

En förklaring till detta skulle kunna vara den skiftande topografin där högresistiva områden, urberg, sticker upp och därmed skapar stor spridning i de beräknade resistivitetsvärdena vilket gör det svårt att se några sammanhängande mönster. Vid lager 28 ökar lagermäktigheten i resistivitetsmodellen från 80 m till 120 m för att sedan öka till 200 m för de återstående lagren. Detta bör innebära att först vid lager 28 skapas en tillräckligt stor jämn botten med högresistivt material sådan att klusteralgorit-



Figur 44. A. Resultat från Klusteranalys. B. Lermäktighet från resistivitetsdata. C. Lermäktighet från brunnar.

men istället identifierar variationerna i de ytligare lagren så att dessa framträder tydligare. Det är alltså återigen berggrundens topografi som skapar problem för analysen men på detta sätt går det ändå att få ut användbara resultat. En slutsats kan troligen dras att vid kraftig topografi i bergrunden bör det modellager som motsvarar översta delen av berggrunden inkluderas i klusteranalysen

För att analysera vidare och komma närmare trovärdiga geologiska voxelmodeller är det möjligt att titta på mindre områden med planare topografi och göra förfinade klusteranalyser, något som dock inte kunnat utföras inom ramen för detta projekt.

Litologisk tolkning

Klusteranalysen visar att det med god säkerhet går att kartera utbredningen av den mäktiga leran som överlagras av sand- och isälvsmaterial. Vid användning av analysverktyget i programvaran för att automatiskt ta fram ett gränsvärde mellan olika litologier erhölls dock inga trovärdiga resultat. Gränsvärdet mellan lera och sand/grus blev som bäst 280 Ohmm (fig. 45) vilket bedöms som ett orimligt resultat då lera brukar ligga på mellan 2 och 50 Ohmm. Analysen visar i princip att det är 100 procents sannolikhet att det är i huvudsak lera överallt. Detta beror i huvudsak troligen på att lera faktiskt förekommer i de flesta borrningar, så långt fungerar verktyget, men algoritmen klarar inte av att urskilja de mindre variationerna i jordlagersammansättningen. Det är troligen kombinationen av mäktiga lerlager och bristfällig noggrannheten på brunnarnas koordinater samt den hastiga laterala förändringen i jorddjup som orsakar dessa problem. Försök gjordes även att titta på mindre delområden men detta begränsades då av att det inte finns ATEM-data och samtidigt tillräckligt många punkter med lagerföljdsinformation inom samma område.

Vidare tolkning av litologi och intressanta områden i Falkenberg har gjorts genom att studera framtagna resistivitetsmodeller längs flygprofilerna istället för att skapa 3D-voxelmodeller utifrån gränsvärden för resistivitet. Geologisk tolkning utifrån flygprofilerna blir alltså en mer subjektiv geologisk tolkning med stöd av ATEM. Svårigheten ligger i att sand, grus och morän kan ha samma resistivitetsvärde. Det går i viss mån att se skillnad mellan vattenmättat och torrt material som överlagrar lera. Ett antal områden har pekats ut där resistivitetsmodellen och närliggande lagerföljder indikerar att det skulle kunna vara större mäktighet av vattenförande sand och grus (bilaga 2).



Sannoliket (%)

Figur 45. Resultat av resistivitets- och lagerföljdsanalys inom Falkenbergs undersökningsområde. Gränsvärdet mellan jämförda litologier avläses som det värde på x-axeln där kurvorna skär varandra, i detta fall ca 280 Ohmm. Det innebär att för resistivitetet i intervallet o-280 Ohmm är det mer sannolikt att det finns lera och för resistivitetsvärden över 280 Ohmm är det mer sannolikt att det finns sand eller grus. Detta har inte betraktats som ett trovärdigt gränsvärde då resistivitet för lera normalt brukar ligga under 100 Ohmm.

Berggrund och sprickzoner

Sprickor i berggrunden har potential att vara av intresse ur ett grundvattenperspektiv då de ofta är mer vattenförande än det kringliggande berget. I undersökningsområdet Falkenberg finns en hel del hällar med strukturer kopplade till sprick- och förkastningszoner som syns i berggrundskartan, se figur 38 i geologiska beskrivningen för Falkenberg avsnitt *Berggrund*.

Inom området finns indikationer i ATEM-data på ett antal sprick- eller svaghetszoner i berggrunden. De mäktiga jordlagren och faktum att mycket av lagerföljden består av lera gör det svårare att lita på tolkningar av sprickzoner i berggrunden.

I undersökningsområdet har resistivitetsfördelningen studerats längs flyglinjer och i resistivitetskartor speciellt nära tidigare tolkade deformationszoner. I några fall har dessa deformationszoner också observerats i ATEM-data, antingen som en dal i berggrundsöverytan eller som en lågresistiv zon som fortsätter ner i berggrunden (se fig. 42 i *Resultat och områdesspecifika tolkningar*). Deformationszoner utgörs i allmänhet inte av linjära strukturer så som de illustreras i en berggrundskarta och fler detaljer kommer fram i ATEM-data där en tolkad struktur ofta framkommer som flera parallella anomalier. De tydligaste zonerna har en nordnordvästlig–sydsydostlig riktning, vilket är vinkelträt mot flygriktningen som gynnar tolkning av strukturer i denna riktning men som också är den dominerande sprickriktningen i området. I figur 46 visas därför potentiella sprickzoner med polygoner som indikerar ett område tillsammans med annan geofysisk data som också indikerar sprick- eller förkastningszoner.



Figur 46. Områden med potentiella sprickzoner som har identifierats i ATEM data tillsammans med lineament tolkning som utgår från annan geofysisk flygdata över området.

Bergöveryta och jorddjupsmodell

Urbergets överyta har kunnat identifieras med god säkerhet på flera platser, i synnerhet områdena i utkanten av den mäktiga leran. Mitt i Ätrans dalgång där lerlagren är som mäktigast blir det svårare att tolka övergången mellan jordlager och bergöveryta. I dessa områden har tolkningen gjorts mer sparsamt. I figur 47 visas alla punkter och deras informationskälla som ingått vid interpolation av ny bergöveryta inom undersökningsområdet.



Figur 47. Figuren visar de punkter som ingått i ny tolkning av bergöverytan med klasser för alla punkter.

För att kunna använda all tillgänglig information har även djupare borrningar som inte avslutats mot bekräftat berg tagits med i datamängden då dessa ändå ger information om minsta möjliga jorddjup i respektive punkt. För dessa punkter har en tolkning av bergöverytan i borrningen gjorts. Generellt ansätts bergöverytan en meter under avslutad borrning men ibland har det funnits annan information i närheten att ta hänsyn till vid tolkning, exempelvis indikationer från ATEM-mätning eller andra djupare borrningar i närheten. Då har en sammanvägd tolkning gjorts för nivå på bergöveryta i aktuell punkt.

Befintlig bergöveryta som är framtagen utifrån SGUs jorddjupsmodell har använts inom områden där mätdata saknas inom undersökningsområdet, exempelvis vid tätorter och hällar där resistivitetsmätningen blir störd och data måste rensas bort. Vid utformning av flygområdet valdes därför konsekvent större hällområden bort.

Resulterande bergöveryta visar på stora uppdateringar med områden både där bergöverytan höjts och sänkts med så mycket som 40 m jämfört med den tidigare bergöverytan framtagen från SGUs jorddjupsmodell (fig. 48). Förändringen i bergöverytan visualiseras dock enklast med en jämförelse mellan SGUs befintliga jorddjupsmodell och den nya jorddjupsmodellen som tagits fram inom projektet.

Vid en jämförelse mellan den uppdaterade jorddjupsmodellen (fig. 48A) och den tolkade utbredningen av mäktiga lerlager (fig. 44) syns att vid stora jorddjup är det också störst mäktighet på lerlagren vilket förefaller geologiskt rimligt avseende bildningsätt.

Analys av data från Brunnsarkivet

SGU utförde en sammanställning av kapacitetsdata för brunnar i Brunnsarkivet och jämförde den mot tolkade jordlager från ATEM-data (fig. 49). Kapacitetsuppgifter från Brunnsarkivet är som nämnts förut att betrakta som en ögonblicksbild av möjlig kapacitet och bör i första hand betraktas som indikativa uppgifter. Brunnsarkivet anger inte alltid vilken typ av brunn det är eller vilket magasin som nyttjas. Det allra flesta brunnarna som rapporteras in till arkivet är dock bergborrade men just i Falkenberg – där det finns stora jorddjup – finns ett flertal brunnar som hämtar vatten från jordmagasinet.

För att avgöra vilket grundvattenmagasin respektive brunn nyttjar gjordes en klassificering av brunnnarna genom att jämföra uppgifterna för varje brunns totaldjup och jorddjup. Båda uppgifterna hämtades från Brunnsarkivet med antagandet att sammanfallande totaldjup och jorddjup indikerar att brunnen hämtar vatten från jordmagasinet. Därefter klassificerades kapacitet för respektive brunnstyp och jämfördes mot den TEM-karterade utbredningen av underlagrande lera (fig. 49). Brunnarna indikeras med fyllda cirklar i figur 49 och storleken på cirkeln korresponderar mot kapacitetsklass för brunnen. Samma skala har använts för båda brunnstyperna. Några klasser blir tomma och har inte tagits med i teckenförklaringen för att göra denna mer överskådlig.

Om en gräns för "bättre" och "sämre" kapacitet för en brunn sätts på omkring 5 l/s finns det 13 stycken bättre bergborrade brunnar respektive 6 stycken bättre brunnar som nyttjar grundvattenmagasinet i jordlagren. Men det finns totalt sett nästan tio gånger fler bergborrade brunnar (422 stycken) jämfört med brunnar som nyttjar jordmagasinet (56 stycken). Brunnar som används av kommunen ingår inte i denna analys då sekretess råder kring dessa brunnar och flera av dessa hämtar vatten från jordmagasinet. Brunnar för enskild vattenförsörjning borras ofta i berget för att det är enklare och billigare att installera en bergborrad brunn med tätt foderrör istället för att sätta filter i jordlagerna. Ofta erhålls ändå tillräcklig kapacitet för ändamålet.

Även om det inte är många bättre brunnar som nyttjar jordmagasinet syns att brunnar av denna typ finns inom områden med stor mäktighet av lera och dessa har ofta bättre kapacitet än bergborrade brunnar i närheten (fig. 49). Det är inte leran i sig som är orsak till en bättre kapacitet eftersom denna är tät med dålig infiltrationskapacitet. Den mäktiga leran kan istället ses som en indikation på en djupare dal eller sänka i berggrunden där det kan ligga vattenförande sand och grus som avsatts direkt på berget och sedan överlagrats med lera. Bättre jordbrunnar finns även i områden med mäk-



Figur 48 . A. Ny jorddjupsmodell i huvudsak baserad på ATEM-data. Röd polygon visar i vilket område som jorddjupsmodellen uppdaterats. B. Skillnaden mellan befintlig och ny jorddjupsmodell.

tiga sand- och grusavlagringar i ytan där mätdata från TEM-undersökningen antingen saknas eller indikerar att det inte finns någon större mäktighet av postglacial lera (fig. 49). Detta är naturligt att förvänta sig eftersom det då bör vara större öppna magasin med goda förutsättningar för grundvattenbildning. Det är i regel inom dessa områden som de kommunala vattentäkterna återfinns.

En brunn strax norr om Vessigebro saknar angiven kapacitet men har en anmärkning om riklig vattenmängd i grundvattenmagasinet under ca 30 m lera, se röd brunn i figur 49. En sådan uppgift är naturligtvis än mindre pålitlig men ger ändå en indikation om förhållandena. Brunnen ligger inom ett område där det saknas ATEM-data men brunnsuppgiften indikerar att utbredningen av mäktiga lerlager som underlagras av sand och grus kan utökas.

Bergborrade brunnar med tätt foderrör ner till berg innebär att grundvattnet från jordmagasinet i brunnens direkta närhet endast i mindre grad bidrar till brunnens uttagskapacitet. Bergets, och brunnnens, uttagskapacitet bestäms därmed av hur bra kontakten är mellan vattenförande sprickor i berget och tillgängligt vatten från nybildningsområden, exempelvis vid hällar och genomsläppliga vattenförande jordlager. Ofta finns de bättre brunnarna som nyttjar berget i de topografiska utströmningsområdena för urberget – det vill säga vid släntfot av höjdområden (fig. 49). Några bättre brunnar i urberget finns även i den centrala delen av Ätrans och Vinåns dalgång i urberget vilket skulle kunna indikera att det här finns vattenförande sprickzoner som står i kontakt med grundvattenmagasinet i jordlagren.



Figur 49. Registrerad kapacitet från brunnsarkivet för bergborrade respektive brunnar som nyttjar jordlagren. Antal brunnar inom varje klass anges inom parentes. Samma storlekskala har använts för att indikera kapacitet för båda brunnstyperna men de klasser som blev tomma vid indelningen har plockats bort för att få en mer överskådlig teckenförklaring. I figuren visas även tidigare karterade namngivna grundvattenmagasin.

Det kan även noteras att det inte finns så många brunnar generellt i de centrala delarna av dalgången. Det beror sannolikt på att det är mest jordbruksmark och att brunnar för enskild vattenförsörjning borras i regel av praktiska skäl i närheten av huset.

Figur 49 visar även tidigare kartering av grundvattenmagasin i jord inom området. Analysen kan alltså till stor del bekräfta utbredningen av tidigare bedömningar. Det skulle kunna vara intressant med vidare utredningar inom svackan i berget norr om grundvattenmagasinet benämnt Heberg och väster om grundvattenmagasinet benämnt Sörby. Resultaten indikerar även till vilket djup borrning måste ske för att komma igenom leran till det undre grundvattenmagasinet vilket är värdefull information när man letar nya vattentäkter.

Vid vidare utredningar blir det viktigt att beakta möjlig nybildning till jordmagasinet för att utröna hur stort ett hållbart grundvattenuttag kan vara. Nybildningen till det undre magasinet hänger på att det finns kontakt mellan randzonerna av den mäktiga leran och nybildningsområdena på de omgivande höjdområdena eller att det finns fönster i det mäktiga lerlagret.

Det finns i dagsläget ingen sammanställning av grundvattenkemin i området. En studie av dels hydrauliska parametrar och dels grundvattenkemi skulle kunna svara på frågor om huruvida det undre magasinet är ett isolerat magasin på stort djup eller om det sker en betydande kontinuerlig grundvattenbildning till magasinet. Det är också viktigt att beakta eventuella risker för sättningar i leran vid ett eventuellt större uttag från det undre magasinet.

Utvalda geologiska miljöer och hydrogeologisk tillämpning

I området finns tre olika geologiska miljöer som kan vara av särskilt intresse för grundvattenuttag och vattenförsörjning. De miljöer som finns representerade inom området illustreras i figur 50. I några av de utpekade delområdena finns mer än en av de geologiska miljöerna vilket gör områdena extra intressanta för framtida grundvattenundersökningar. Varje miljö belyses även mer ingående med ett exempel. En kort sammanfattning av övriga intressanta områden finns i bilaga 2. De tre geologiska miljöerna är:

1. Sand- och grusavlagringar med stor mäktighet

Jordlagren kan vara helt, delvis eller inte alls mättade med grundvatten och därav på olika sätt intressanta. Dessa sand- och grusavlagringar, ofta 20–40 m mäktiga, överlagrar ibland ett mäktigt lerlager. I vissa fall finns det dock så kallade "fönster" ner till berg, det vill säga sandiga och grusiga sediment ända ner till berggrunden. Denna geologiska miljö är intressant då en stor del av grundvattenbildningen sker här och uttagskapaciteten kan vara stor om det finns tillgängligt grundvatten. Om områdena är mestadels torra kan de användas som infiltrationsområden.

2. Sand- och grusavlagringar som underlagrar finkorniga och täta jordarter med stor mäktighet

Mäktiga sand- och grusavlagringar förekommer i vissa fall i begravda dalar (sedimentfyllda dalsänkor i jordlagren som döljs av ovanliggande jordlager) och i vissa fall som underjordiska åsar och platåer. Underlag från borrningar visar att denna geologiska miljö är relativt vanlig i stora delar av området. Områden med denna geologiska miljö är intressanta då grundvattnet bör vara väl skyddat mot föroreningar här. Magasinets storlek och nybildning av grundvatten kan vara begränsad. Bäst är förutsättningar om det finns ett större område med sand- och grusavlagringar eller om det finns ett nybildningsområde (geologisk miljö 1) i anslutning.

3. Sprickzoner i urberg

Sprickzoner har ofta relativt hög porositet vilket gör att vattnet rör sig lättare här. Generellt tenderar dalgångar, ofta med vattendrag, finnas i liknande zoner. Ligger sprickzonerna nära markytan eller står i kontakt med ytvatten genom geologisk miljö 1 finns ofta extra stor potential för grundvattenuttag.







Figur 50. Schematisk illustration av de tre identifierade geologiska typmiljöerna i Falkenberg.

I tabell 3 och figur 51 visas utpekade områden där det finns en geologisk miljö som kan vara intressant för framför allt större grundvattenuttag. I områden med befintliga vattentäkter är mycket av data störda och därmed borttagna.


Tabell 3. Hydrogeologiskt intressanta områden (A-I i figur 51) och deras koppling till geologisk miljö (figur 50). Områden med kursiverad text presenteras i rapporten, övriga områden redovisas i bilaga 2..

ID	Område	Geologisk miljö
Α	Rävige	3
В	Höstena	1, 2, 3
c	Bergagård	2
D	Kärreberg Södra	2
Ε	Glostorp–Vessige	1, 2
F	Vinberg	2
G	Veneberg–Sörby	2
н	Heberg	1, 2
I	Boberg	1, 2, 3

Figur 51. Utpekade hydrogeologiskt intressanta områden. Namn och relation till olika geologiska miljöer (figur 50) redovisas i tabell 3.

1. Sand- och grusavlagringar med stor mäktighet. Exempel Glostorp-Vessige

Området Glostorp–Vessige ligger i de nordöstra delarna av undersökningsområdet, öster om Ätran (fig. 52A–B). I söder vid Vessige finns en vattentäkt och ett vattenskyddsområde. Området domineras av isälvsavlagringar i ytan. Markytan är generellt relativt plan på nivå mellan 40 och 48 m ö.h. I de södra delarna har dock Lillån eroderat ner 10–15 m i jordlagren.

Resistivitetsdata pekar mot att området domineras av sand- och grusavlagringar, dels som mäktiga avlagringar på 20–40 m som agerar som fönster, till exempel västnordväst om Glostorp (fig. 52, 53), och dels 5–10 m mäktiga som underlagrar silt och lera, till exempel norr om Vessige. Även området söder om Glostorp, mot Lillån, kan vara intressant. Här pekar resistivitetsdata också på att det troligen finns sand- och grusavlagringar under lera.

Det finns ett fåtal brunnar med lagerföljdsinformation som verifierar att det finns sand- och grusavlagringar under lera, exempelvis strax söder om Bjerrome, där uttagskapaciteten är angiven till 40 000 l/tim. För brunnarna mellan Väby och Vessige anges en kapacitet på 6000 l/tim.

Öster om området med ATEM-data finns isälvsavlagringar där det tidigare bedrivits materialtäktverksamhet. Dessa avlagringar har troligen kontakt med sand- och grusavlagringarna mot väster. Området utgör ett intressant infiltrationsområde. Akviferens magasinering av grundvatten och uttagskapacitet skulle kunna ökas genom infiltration med ytvatten från Lillån under tider med höga flöden.



Figur 52. A. Översiktskarta över området Glostorp–Vessige. B. Karta över området Glostorp–Vessige med jordartskarta som bakgrund.



Figur 53. Profil inom området Glostorp–Vessige. Profilens läge syns i figur 52.



Figur 54. A. Karta över området Heberg. B. Karta över området Heberg med jordartskarta som bakgrund. Grå streckad polygon markerar var Skreadrumlinen finns. Blå pilar visar på trolig riktning för grundvattentransport till den utpekade akviferen Heberg.

2. Sand- och grusavlagringar som underlagrar finkorniga och täta jordarter med stor mäktighet. Exempel Heberg

Vid området Heberg (fig. 54A–B) indikerar resistivitetsdata en potentiellt intressant företeelse som ligger i västnordvästlig–sydsydostlig riktning. Tolkningen är att det ligger en begravd dalgång här som i botten delvis är fylld med sand och grus (fig. 55). Det finns brunnar inom området som visar på upp till 5 m mäktiga sand och grusavlagringar inom området. (fig. 54A). I områdets nordvästra kant ligger Skreadrumlinen med en nordnordostlig–sydsydvästlig riktning (fig. 54B).

Brunnar nedförda i grundvattenmagasinet Heberg vittnar om goda uttagskapaciteter – flera av brunnarna ligger över 10 000 l/tim. Ytterligare brunnar mot sydost, längs E6, visar på liknande uttag. Gissningsvis fortsätter samma grundvattenmagasin hitåt, åtminstone till och med samhället Heberg. Den storskaliga analysen av kapacitet för brunnar, urbergets morfologi och lerans utbredning i hela området talar för att det kan finnas intressanta områden i mitten av dalgången ända upp till området i höjd med Sörby (jämför fig. 49 avsnitt *Analys av data från Brunnsarkivet*). Bäst förhållanden har dock identifierats kring Heberg.

I de centrala delarna når lerlagret en mäktighet på 10–30 m och den lokala grundvattenbildningen här är liten. Det mäktiga lerlagret skyddar dock bra mot föroreningar som uppstår lokalt. Det är troligt att det sker nybildning av grundvatten norrifrån i den huvudsakliga transportriktningen längs med dalen i urberget men kanske kan även Skreadrumlinen bidra. Resistiviteten i Skreadrumlinen är hög, ibland över 300 Ohmm, och vid utgrävningar har sandig–siltig morän påträffats snarare än grus. Det skall även finnas inslag av lerlinser i moränen. Det är därmed tveksamt hur mycket nybildning



Figur 55. Profil inom området Heberg. Profilens läge syns i figur 54.

som kan ske i området med tanke på att det sannolikt är tätare jordlager på djupet men det är inte uteslutet att området kan bidra något till undre magasin i dalgången.

Söder om området finns även den mest framträdande förkastningszonen inom hela undersökningsområdet, i stort sett längs E6. Förkastningen har tolkats ha en både vertikal och en parallell förskjutning. På grund av E6 finns tyvärr ingen ATEM-data vid motorvägen. Dock finns det flera borrningar, många av dem tyder på att det även här finns mäktiga och därmed intressanta jordlager bestående av sand och grus under lera. Förkastningszonen i sig kan också utgöra en intressant företeelse hydrogeologiskt sett då berggrunden kan vara uppsprucken och vattenförande här. Förändringar i berggrundens topografi skapar även förutsättningar för snabba förändringar i avsättningsförhållanden och därmed jorddjup och litologi. Mäktigheten på leran är mellan 20 och 40 m i närområdet (jämför fig. 44), något som gör områdets hydrogeologiskt intressanta delar relativt välskyddade mot till exempel föroreningar från E6.

3. Sprickzoner i urberg. Exempel Höstena

Området Höstena ligger i något som kan liknas vid en smal flaskhals där Ätran slingrar sig mellan två höjdområden (fig. 56A). I området finns troligen en sprickzon i ostsydostlig–västnordvästlig riktning som syns tydligt som en lågresistiv zon i ATEM-data (fig. 56A–B och 57). Det finns bara data från två flyglinjer här men zonen är tydlig i båda. Zonen är ca 500 m bred och resistiviteten är betydligt lägre här än vid sidan om. Jordlagren är mäktiga i området – mellan 30 och 50 m – och består till största delen av lera, ibland överlagrat av ett relativt tunt lager svallsand. Enligt den preliminära grundvattenkarteringen som gjordes år 2011 (se fig. 41 avsnitt *Grundvattenmagasin i jordlagren och berggrund*) finns ett grundvattenmagasin i jordlagren (Kärreberg) som korsar genom det intressanta området som nu identifierats i ATEM-data. Det verkar dock inte finns någon större kontakt med deltaavlagringen vid Askome, se jordartskarta figur 56B. Resistivitetsdata visar på att det finns mäktiga lerlager även under deltat. Det finns dock en brunn samt indikationer i resistivitetsdata på att det finns sand- och grusavlagringar under leran i södra delen av deltat, så det är inte osannolikt att så kan vara fallet även i området vid sprickzonen. Det finns även indikationer i resistivitetsdata på att det finns en djupare sänka i öst–västlig riktning. Dalgångar syns i flera profiler öster om utpekat område. Det skulle kunna finnas vattenförande gruslager under mäktiga lager med lera, se figur 58.



Figur 56. A Terrängkarta över området med den tolkade sprickzonen profil 1 vid Höstena och läge för profil 2 öster om området vid misstänkt läge för sänka i urberget. B Jordartskarta med utpekat område och profiler.



Figur 57. Profil 1 över den tolkade sprickzonen vid Höstena berg. Profilens läge (A)syns i figur 56. Svart linje motsvarar tolkad överyta för urberget. Anomalin syns som ett område med lägre resistivitet i den i övrigt högresistiva berggrrunden.



Figur 58. Profil 2 över tolkade sänkor i urberget som kan indikera sprickzon och där det skulle kunna finnas sand och grus under lera. Profilens läge (B) syns i figur 56. Svart linje motsvarar tolkat läge för urbergets överyta.

Höstena ligger i Ätrans och nybildning sker troligen i isälvsavlagringen vid Askome och kanske i älvgruset väster om Ätran (fig. 56B). Eventuellt sker även viss nybildning i sand och grusavlagringen söder om kraftverket.

Det mäktiga lerlagret gör att den lokala nybildningen är liten. Förekomst av större magasin i det utpekade området styrs därför av om det finns kontakt eller ej till omkringliggande mer permeabla avlagringar runt det utpekade området. Dock sker det troligen en ansamling av grundvatten i dalbotten då Ätrans dalgång är smal här.

Det vore lämpligt med en borrning för att se om berggrunden är uppsprucken och vattenförande. Till att börja med kan andra geofysiska undersökningar (exempelvis VLF) utföras i området väster och öster om undersökningsområdet för att ytterligare klarlägga förhållandena. Leran är ofta över 25 m mäktig i området (jämför fig. 44, avsnitt *Klusteranalys*) vilket gör områdets hydrogeologiskt intressanta delar relativt välskyddade mot föroreningar.

SLUTSATSER OCH DISKUSSION

Hydrogeolgisk tolkning

Undersökningen med helikopterburen ATEM i Halland har resulterat i insamling av en stor mängd resistivitetsdata samt inledande geologisk och hydrogeologisk tolkning av denna. Inom båda undersökningsområdena har det varit möjligt att tolka urbergets överyta i ett stort antal punkter vilket väsentligt förbättrat SGUs modell för jorddjup/bergöveryta. Det har också varit möjligt att med relativt god säkerhet tolka utbredning och geometri av mäktiga lager av lågresistivt finmaterial (lera) inom båda områdena. Det är dock svårare att skilja mellan sand- och grusavlagringar (vattenmättad eller torr) och morän eller jordlager med inblandat finmaterial eftersom resistiviteten för dessa sammansättningar överlappar varandra.

Den hydrogeologiska tolkningen har resulterat i identifiering av intressanta områden som kan vara av vikt för både kommunal och enskild vattenförsörjning. Dessa områden utgörs av en eller flera geologiska miljöer som finns inom undersökningsområdena. Tolkning har i första hand skett längs ATEMflygprofilerna. Resistiviteten har jämförts mellan profiler, tillgängliga borrningar och den konceptuella geologiska modellen för området. De hydrogeologiska typmiljöerna som har identifierats är:

- 1. Sand- och grusavlagringar med stor mäktighet
- 2. Sand- och grusavlagringar som underlagrar finkorniga och täta jordarter med stor mäktighet
- 3. Sprickzoner i urberg
- 4. Kritberggrund (endast i sydvästra delen av området Laholm).

Rekommendationer för vidare arbeten avseende vattenförsörjning

Sammanlagt har 18 områden i Laholm (fig. 26, avsnitt *Utvalda geologiska miljöer och hydrogeologisk tolkning* Laholm) och 9 områden i Falkenberg (fig. 50, *Utvalda geologiska miljöer och hydrogeologisk tillämpning* Falkenberg) identifierats där förhållandena är sådana att utökade undersökningar och vidare tolkning av data skulle kunna leda fram till lokalisering av nya brunnslägen, information om nybildningsområden eller lägen för nya infiltrationsanläggningar. Nedan redovisas ett antal rekommendationer för vidare arbeten avseende vattenförsörjning inom de intressanta områdena.

• Laholm – Nya potentiella lägen för vattentäkter

Prioritera bland ett antal möjliga nya vattentäktslägen och utför provborrningar samt hydrauliska tester vid Årnabergasjö, Skogabysjö, Värestorp, Bonnarp, Ränneslöv, och Vindarp.

• Laholm – Utbyggnad av befintliga vattentäkter

I områdena kring befintliga vattentäkter, Veinge, Skottorp–Valleberga, Eskilstorp, Hasslöv bör ATEM-data användas för att till exempel leta nya brunnslägen, nya infiltrationsområden och för utformning av vattenskyddsområden.

• Laholm – Kritberggrund

Utför en utökad kartläggning av kritbergrunden, fler provborrningar behövs. Utförlig kunskap behövs som kan ligga till grund för en varaktig förvaltning av resursen. Beslutsunderlag behövs för att kunna resonera kring om geoenergiborrningar skall tillåtas här eller om resursen ska vara enkom för vattenförsörjning.

• Falkenberg – Nya potentiella lägen för vattentäkter

Prioritera bland ett antal möjliga nya vattentäktslägen och utför provborrningar och hydrauliska tester vid Heberg, Broberg, Glostorp–Vessige, Veneberg, Berggagård, Höstena.

• Falkenberg – Utbyggnad av befintliga vattentäkter

I områdena kring befintliga vattentäkter, Kärreberg, Sörby, Vinåns dalgång, Vessigebro bör ATEM-data användas för att till exempel leta nya brunnslägen, nya infiltrationsområden och för utformning av vattenskyddsområden.

• Falkenberg – Undersök undre magasin i centrala delen av Ätrans dalgång

Analysen av brunnskapaciteter i jämförelse med tolkad utbredning av leran indikerar ett potentiellt större undre magasin norr om utpekat område Heberg och väster om preliminärt grundvattenmagasin Sörby. Området bör undersökas närmare med borrningar, hydrauliska tester, och analys av grundvattenkemi för att utröna om magasinet kan ha tillräcklig nybildning för att tåla ett större uttag avseende kommunal vattenförsörjning.

De geologiska miljöerna benämnda 2, 3 och 4 är ofta, till största delen, täckta av mäktiga jordlager bestående av täta jordarter i form av lera vilket gör att de är relativt välskyddade mot föroreningar. De kartor som visar utbredning av mäktiga lerlager (fig. 22, avsnitt *Mäktiga lerlager uner insälvsavlagringar* samt fig. 49 avsnitt *Analys av data från Brunnsarkivet*) utgör ett viktigt underlag när det gäller till exempel sårbarhetskartering och frågor som rör vattenskyddsområden. Det är värdefullt för både vattenproducenter och markägare att till exempel kunna göra avvägningar av var det bör finnas långtgående restriktioner respektive var något lägre restriktioner är lämpligare. Lika viktigt är att ha en pålitlig sårbarhetskarta, speciellt nära befintliga vattentäkter.

ATEM-metoder är generellt sett väldigt kostnadseffektiva, men inte lämpliga i alla miljöer. Vid komplex geologi kan det behövas olika strategier för olika områden och kanske komplettering av markgeofysiska mätningar och borrningar.

SGU har testat en ny TEM-metod, tTEM, inom projektet som visat sig vara ett mycket bra komplement till ATEM mätningar. Insamlingen sker via ett TEM-system som dras på en släde av en fyrhjuling och täcker därmed relativt stora områden snabbt. Tätheten av datapunkter är högre jämfört med ATEM och därmed blir den rumsliga upplösningen också bättre. Djupkänningen är dock mer begränsad, ofta ca 70 m. Förslagsvis kan denna metod användas för att i högre detalj undersöka intressanta områden och områden kring vattentäkter. Relativt plana och öppna marker är förutsättningen för en sådan mätning, vilket är fallet på många ställen i båda undersökningsområdena.

Mätmetodens begränsningar och möjligheter

Den mest uppenbara svårigheten med resistivitetsdata är att olika geologiska material har resistivitetsintervall som överlappar varandra. Det går alltså inte att göra en direkt översättning från resistivitet till geologiskt material. En resistivitet på 80 Ohmm motsvarar inte alltid vattenmättad sand och grus utan kan också motsvara sand och grus med inblandning av finmaterial. All tolkning och modellering kräver geologisk och hydrogeologisk kunskap och förståelse för sammansättning och bildningsprocesser. Om geologin är relativt plan och homogen (plana horisontella lager) blir tolkning och översättning i allmänhet enklare då också resistivitetsmönstret blir enklare. Vid stora variationer både gällande sammansättning och geometri av geologiska lager krävs i allmänhet att mindre områden studeras samt att det finns god tillgång till kompletterande information av god kvalitet såsom borrningar eller andra geofysiska mätningar. ATEM-undersökningarna i Laholm och Falkenberg är bland de första utförda med syfte att kartera jordlagerföljden ovan kristallin berggrund i Sverige. ATEM lämpar sig väl när syftet är att hitta något konduktivt, till exempel vattenförande grova jordlager eller lera, i en omgivning med högre resistivitet, till exempel torra grövre jordlager eller berggrund.

I undersökningen flög helikoptern även över områden där torra jordlager av mindre mäktighet ligger ovanpå berggrunden och data inom dessa områden gick inte att använda. Slutsatsen blir att i områden där urberget är täckt med mindre än ca 5–10 m jordlager är ATEM ingen lämplig metod. Det går däremot att konstatera att det inte finns några betydande lågresistiva lerlager inom dessa områden vilket i sig ändå är relevant information.

Trots nämnda metodbegränsningar vid kartering av urberg kunde ändå lågresisitiva zoner i berget till viss del identifieras – dessa skulle kunna vara vattenförande sprickzoner. Vid genomgång av resistivitetsvariationer längs befintliga karterade sprickzoner (i SGUs databas) har det dock inte funnits någon klar korrelation vilket kan bero på flera olika saker. Tidigare tolkningar av sprickzoner inom områdena med mäktiga jordlager är baserade på andra geofysiska data, VLF och magnetfältsdata. VLF-metoden är i allmänhet en bra metod för att kartera lågresistiva zoner i berggrunden. Metoden har dock, liksom ATEM, en begränsad djupkänning under mäktiga lerlager. Tidigare tolkningar av sprickzoner inom undersökningsområdet har främst baserats på magnetfältsmätningar. I denna typ av data kan avbrott eller förskjutningar i det magnetiska mönstret tolkas som förkastningar eller sprickzoner. Längs några sprickzoner har dock lågresistiva områden identifierats ur ATEM data och detta gör tolkningen av en sprickzon mer säker. SGU anser dock att om en indikation på en lågresistiv zon i berget endast återspeglas i ATEM-data bör kompletterande undersökning utföras för att undersöka om orsaken är en sprickzon.

3D-modellering

SGU har påbörjat ett arbete med att konstruera geologiska 3D-modeller enligt beskriven metodik i denna rapport. Modellering har utförts dels genom att försöka hitta resistivitetsintervall för att bygga upp modeller med voxlar för olika litologier och dels genom att försöka tolka kontinuerliga ytor av lagerföljder. Geologin är synnerligen komplex i båda undersökningsområdena, med stora växlingar i jordlagerföljden. Kontinuerliga sammanhängande ytor har endast gått att ta fram för bergets överyta inom respektive undersökningsområde. Vid hantering av lateralt begränsade lager och geologiska linser kan voxel-modellering vara ett attraktivt sätt att ändå kunna skapa en tredimensionell bild av geologin.

Problem uppstod vid omvandling från resistivitets 3D-voxelmodell till geologisk 3D-voxelmodell. Det är alltför stora överlapp mellan intervallen för vilka resistivitetsvärden som troligen motsvarar en viss litologi. För att angripa problemet delades mätområdet upp i regioner där olika intervall används inom olika områden. Detta kunde utföras med viss framgång i Laholm men var inte möjligt i Falkenberg. Undersökningsområdena liknar varandra och har en liknande avsättningshistoria men ändå gav analysen väldigt olika resultat. Den stora skillnaden mellan områdena är urbergets topografi och fördelningen av tillgängliga data från brunnar och borrningar.

I Laholm är bergets topografi en relativt jämn sluttning ut mot havet vilket ger större sammanhängande horisontella strukturer och därmed enklare tolkning. Variationen på resistivitetsintervallen i Laholm tycks mer bero på andel lera och mineralsammansättning i jordlagren. Variationen är mer jämn vilket gör det lättare att kompensera för denna genom uppdelning i olika områden.

I Falkenberg utgör urbergets överyta en kraftigt kuperad yta där mitten på dalgången i urberget kan ligga på -60 m ö.h. medan närliggande toppar som syns i markytan ligger på +70 m ö.h. Dessa kraftiga variationer i jorddjup, på korta avstånd, gör att det omgivande högresistiva urberget stör signalen avsevärt. Det ligger dessutom mäktiga lager lera mellan urbergshöjderna vilket dämpar signalen och dessa båda effekter skapar tillsammans en väldigt splittrad bild av resistivitetsfördelningen i jordlagren utan tydliga gränser mellan olika litologier utöver det som är tydligt lågresistivt och kan tolkas till lera.

Även den rumsliga fördelningen av borrhål tillgängliga för tolkningshjälp vid översättning från resistivitet till litologi spelar stor roll. I Falkenberg finns borrningar koncentrerade till kanterna av undersökningsområdet där det ofta ändå finns för mycket störningar för att kunna använda insamlad ATEM-data. I de centrala delarna av flygområdet är det i huvudsak jordbruksmark med stora arealer med endast några få brunnar eller borrningar. Dessa områden sammanfaller dessutom av naturliga skäl med den mäktiga leran och de tolkningsproblem som finns med denna typ av miljö som redan beskrivits.

Av nämnda anledningar har SGU i nuläget inte tagit fram några heltäckande 3D-modeller med voxlar annat än en generell jord–berg modell för respektive område. Utbredningen av lera ska tas fram som 3D-volymer inom både Laholm och Falkenbergs undersökningsområde. Detta kräver en ingående analys för hur gränsdragningen mellan olika avsättningar skall göras inom olika delområden i undersökningsområdena vilket det inte funnits möjlighet till inom ramen för detta projekt.

Vidare arbete med data

Den stora mängden data, tillsammans med annan geologisk information, gör det möjligt för till exempel konsulter att utföra fördjupade analyser av de geologiska förhållandena inom undersökningsområdena.

Där det idag finns vattentäkter kan det finnas mer data som kommun eller konsulter har tillgång till som kan förbättra tolkningarna avsevärt inom ett mindre område. För att ändå belysa vilka möjligheter som finns har SGU därför fokuserat på ett fåtal områden som uppvisar förhållanden som gör dem hydrogeologiskt intressanta. De tolkade och utvärderade resultaten som presenteras i rapporten visar också hur man kan förbättra underlaget genom att kalibrera och verifiera tolkningar med kompletterande undersökningar, till exempel i form av borrning samt geofysiska mark- och borrhålsundersökningar.

Resistivitetsdata kan även ha användningsområden som inte utvärderats inom detta projekt. SGU ser gärna att konsulter, myndigheter, och högskolor använder sig av insamlad ATEM-data för att se om den kan bidra till att eventuellt lösa fler frågeställningar. Helikoptern gjorde några flyglinjer längs kusten i Laholm för att utvärdera denna möjlighet att studera stranderosion och jordartskartering i bottensediment. Trots saltvattnet är bedömningen att det går att se relativa skillnader mellan områden, något som tolkas som mer respektive mindre sand, vilket skulle kunna leda till att kartlägga ackumulations- och erosionsbottnar. Andra aktuella studier är exempelvis översvämningskartering där data längs till exempel Ätran och Lagan kan berätta om jordlagerföljd på djupet samt var det finns berg. Vid översvämningar då vatten behöver ledas bort snabbt är kunskap om områdens infiltrations- och magasineringskapacitet viktigt.

REFERENSER

- Andersson, J., Möller, C., Lundqvist, I., Bastani, M. & Antal-Lundin, I., 2019: Beskrivning till berggrundskartan Falkenberg. *Sveriges geologiska undersökning K624*, 65 s.
- Bergerat, F., Angelier, J., & Andreasson, P. G., 2007: Evolution of paleostress fields and brittle deformation of the Tornquist Zone in Scania (Sweden) during Permo-Mesozoic and Cenozoic times. *Tectonophysics*, 444(1), 93–110.
- Christiansen A.V., Auken, E. & Sørensen, K., 2009: The transient electromagnetic method. In: Kirsch R. (eds) Groundwater Geophysics. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Christensen, W.K., 1993: Upper Cretaceous belemnitellids from the Båstad Basin, southern Sweden. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar 115*, 39–57.
- Dahlqvist, P., Triumf, C.-A., Persson, L., Bastani, M., Erlström, M., Jørgensen, F., Thulin Olander, H., Gustafsson, M., Thorsbrink, M., Schoning, K. & Curtis, P., 2015: SkyTEM-undersökningar på Gotland. *Rapporter och Meddelanden 136*, Sveriges geologiska undersökning, 108 s.
- Dahlqvist, P., Triumf, C.-A., Persson, L., Bastani, M., Erlström, M., & Schoning, K., 2017: SkyTEM-undersökningar på Gotland, del 2. *Rapporter och Meddelanden 140*, Sveriges geologiska undersökning, 135 s.
- Dahlqvist, P., Bastani, M., Persson, L., Triumf, C.-A., Erlström, M., Gustafsson, M, Jörgensen, F., Gulbrandsen, M., & Malmberg Persson, K., 2018: SkyTEM-undersökningar på Öland. *Rapporter och Meddelanden* 145, Sveriges geologiska undersökning, 100 s.
- Daniel, E., 2006: Beskrivning till jordartskartorna 4C Halmstad NV, NO och SO. *Sveriges geologiska undersökning K57–59*, 114 s.
- Daniels, J. & Thunholm, B., 2014: Rikstäckande jorddjupsmodell, *SGU-rapport 2014:14*, Sveriges geologiska undersökning, 14 s.
- Engdahl, M., Samuelsson, L., Lundqvist, I. & Bengtsson, S., 1994: Inventering av naturgrus och krossberg i Hallands län. *Länsstyrelsen i Hallands län, Miljövårdsenheten 1994:23*, 404 s.
- Engdahl 1997, M., 1997: Clast lithology, provenance and weathering of Quaternary deposits in Västergötland, Sweden. *Earth Sciences Centre, Göteborg University A 16*, 90 s.
- Engdahl., M., 2011: Beskrivning till jordartskartan 5C Ullared NV. Sveriges geologiska undersökning K379, 27 s.
- Gillberg, G., 1965: Till distribution and ice movements on the northern slopes of the south Swedish Highlands. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar 86*, 433–484.
- Grigull, S., & Andersson, J., in press: Brittle structures at the Stavsjö quarry. *SGU-rapport 2019:05*, Sveriges geologiska undersökning, 18 s.
- Hägg, R., 1940: Die Mollusken und Brachiopoden der Kreide bei Tormarp in Schweden. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar 62*, 213–233.
- Jakobsson, M., Björck, S., O'Regan, M., Flodén, T., Greenwood, S.L., Swärd, H., Lif, A., Ampel, L., Koyi, H., & Skelton, A., 2014: Major earthquake at the Pleistocene-Holocene transition in Lake Vättern, southern Sweden. *Geology 42(5)*, 379–382.
- Karlqvist, L, De Geer, J, Fogdestam, B, och Engqvist, P. 1985: Beskrivning och bilagor till hydrogeologiska karta över Hallands län. *Sveriges geologiska undersökning Ah* 8, 73 s.
- Laroche m.fl. 2014La Roche, A., Stark, M., Johansson, L., Rhede, D., & Hansen, E.C., & Bornhorst, T.J., 2014: Hydrothermal formation of epidote in felsic compositions: examples from Sweden and northern Michigan. Geological Society of America annual meeting in Vancouver, British Columbia, Canada. Abstract volume
- Lidmar-Bergström, K., 1998: Bergrundens ytformer. I Berg och jord. Sveriges nationalatlas. Red. Fredén, C.
- Lundqvist, I., & Carlsäter Ekdahl, M. 2014: Beskrivning till berggrundskartorna Halmstad–Laholm. Sveriges geologiska undersökning K455, 21 s.
- Löfroth, H., Persson, L., Bastani, M., Rodhe, L., Hedfors, J., With, C., Ekström, J. & Engdahl, M., 2018: *Tillämpning och utvärdering av metodik för kartläggning av kvicklera*, Statens geotekniska institut, SGI.

- Möller, C., & Andersson, J., 2018: Metamorphic zoning and behaviour of an underthrusting continental plate. *Journal of Metamorphic Geology 36 (5)*, 567–589.
- Möller, C., Andersson, J., Rebay, G., 2015b: Very-high temperature metamorphism and deformation in the footwall of an eclogite-bearing nappe, Sveconorwegian orogen: meta-leuconoritic and sapphirine-bearing rocks of the Obbhult complex, SW Sweden. *Abstract T14A-070*, AGU Joint Assembly, Montreal, 3–7 May 2015.
- Norling, E. & Skoglund, R., 1977: Der Südwestrand der Osteuropäischen Tafel im Bereich Schwedens. Zeitschrift für angewandte Geologie 23, 449–458.
- Piñán Llamas, A., Andersson, J., Möller, C., Johansson, L., Hansen, E., 2015: Polyphasal foreland-vergent deformation in a deep section of the 1 Ga Sveconorwegian orogen. *Precambrian Research 266*, 121–149.
- Påsse, T., 1988: Beskrivning till kartbladet Varberg SO/Ullared SV. Sveriges geologiska undersökning Ae 86, 98 s.
- Påsse, T. & Andersson, L., 2005: Shore-level displacement in Fennoscandia calculated from empirical data. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar, 127,* 250–268.
- Ringberg, B., Beskrivning till jordartskartan Halmstad SV. Sveriges geologiska undersökning Ae 121, 52 s.
- Robison, J. M., 1983: Glaciofluvial sedimentation: a key to the deglaciation of the Laholm area, southern Sweden. *Lundqua thesis 13*, Lund University, Department of Quaternary Geology, 92 s.
- Sørensen, K.I., & Auken, E., 2004: SkyTEM a new high-resolution helicopter transient electromagnetic system. *Exploration Geophysics*, *35 (3)*, 194–202.
- Triumf, CA 1992: Geofysik för geotekniker, BFR T31:1992, Byggforskningsrådet.
- Viezzoli A, Christiansen AV, Auken E, Sørensen KI (2008) Quasi-3D modelling of airborne TEM data by spatially constrained inversion. *Geophysics 73 (3)*: F105–F113.
- Wikman, H. & Bergström, J., 1987: Beskrivning till berggrundskartan Halmstad SV. Sveriges geologiska undersökning Af 133, 79 s.

BILAGA 1. INTRESSANTA OMRÅDEN I LAHOLM



ID	Område	Geologisk miljö	Redovisas
A	Tjärby	1,2	bilaga 1
В	Veinge	1,2,3	bilaga 1
с	Årnabergasjön	1,2	huvudrapport
D	Skogabysjön	1,2	bilaga 1
E	Bonnarp	1,2,3	bilaga 1
F	Furala	1	bilaga 1
G	Lagan Laholm	1,2,3	bilaga 1
н	Laholm SO	1,2,3	bilaga 1
L	Edenberga	1,2,3?	bilaga 1
J	Skottorp Vallberga	1,2,4	bilaga 1
к	Ränneslöv jord	1,2	bilaga 1
L	Ränneslöv berg	3	huvudrapport
м	Värestorp	2	huvudrapport
N	Eskilstorp	1,2,4	bilaga 1
0	Rostorp	1,2	bilaga 1
P	Hasslöv	1,2,4	bilaga 1
Q	Vindarp	1,2,3?	bilaga 1
R	Kritberggrund	4	huvudrapport





Torv

- Mossetorv Kärrtorv
- Svämsediment, ler--silt
- Svämsediment, sand
- Svämsediment, grus
 - Flygsand
- Silt
- Postglacial finsand
- Postglacial sand
- Svallsediment, grus
- Glacial lera
- Isälvssediment
- Isälvssediment, sand
 - Morän
 - Sandig morän
 - Berg
- Fyllning







Lagerföljdsdatabas

- brunnsarkivet
- grundvattenkartering
- jordartskartering



TJÄRBY

Området ligger i ett skogsparti i norra delen av undersökningsområdet. Här finns en liten isälvsavlagring karterad i ytan, och det finns borrningar med sand/grus hela vägen (40m, borrning EDA040030) samt med sand och grus under lera (borrningar 914013938 & 909063026).

Hypotesen var att den karterade isälvsavlagringen fortsätter under lera och att dess utbredning går att klarlägga med hjälp resistivitetsvärden.

SGUs borrning (BMW181100) kan delvis bekräfta denna hypotes. De övre jordlagren består av tunn svallsand följt av mäktig lera och finmaterial ner till 16.5m, därefter 6m isälvsmaterial. Därefter kunde ingen bedömning av jordart göras. Sondering utfördes ner till 28m där borraren ansåg att det var stop mot berg.

Inom området finns troligen både möjliga infiltrations- och uttagsområden. Dock är det osäkert hur stor grundvattentillgången är.





VEINGE

Området Veinge ligger i norra delen av undersökningsområdet och här finns en kommunal vattentäkt.

En samtolkning av resistivitetsdata och lagerföljder från brunnar visar att det finns ett övre jordlager med sand som underlagras av finkornigare jordarter, men under denna lera finns ofta ytterligare ett lager med sand och grus. I några områden (se 150-300m i profilen) har det lågresistiva lagret en något högre resistivitet, dessa områden kan vara mer sandiga och kan vara lokala nybildningsområden.

I berggrunden finns en lågresistiv zon, 450-550m i profilen, som indikerar att det även kan finnas en sprick- eller svaghetszon i berggrunden.

Kommunen eller en konsult föreslås komplettera med data från vattentäktsbrunnar och på så sätt få en detaljerad 3D-modell över området.

ATEM - datapunkt

profil

brunnsarkivet

jordlagerföljder

parameterdatabas









SKOGABYSJÖ

Området ligger öster om det i rapporten beskrivna området Årnaberga och förutsättningarna påminner om varandra. I anslutning till området ligger Skogabysjö som är en dödissjö.

Väster om sjön (grön polygon) finns högresistiva ytliga sediment tolkade som sand- och grusavlagringar med stor mäktighet (>20m) som troligen utgör ett fönster och fortsätter ända ned till berget (se 300-700m i profil A-A'). Stora delar av avlagringarna är torra och området utgör ett möjligt infiltrationsområde. Det finns lagerföljder (EDA040025) som stödjer tolkningarna.

Söder om detta område och sjön finns ett område (rosa polygon) med något lägre resistivitet, men ändå så pass hög att det tolkas som att avlagringarna består av sand och grus, men vattenmättad sådan, se 400-700m i profil B-B'. Möjligt uttagsområde.

Öster och sydost om sjön finns en dal i berggrunden (blå streckad polygon). Även här verkar det finnas ett fönster, i alla fall saknas det ett mäktigt lerlager. Resistiviteten tyder på sand och grus (syns även i borrning 905163416) som är vattenmättad vilket gör det till ett möjligt uttagsområde.

- ATEM datapunkt
 Dal i berggrund
 - und brunnsarkivet
- Dal I berggrund
- Eventuellt vattenmättad
- ---- Torr sand och grus, '---' infiltrationsområde
- jordlagerföljder

parameterdatabas

profil





BONNARP

Området ligger nordost om Laholm och söder om Årnabergasjö som beskrivs utförligt i rapporten. De geologiska förutsättningarna påminner om varandra. Tolkningar av resistivitetsdata indikerar på mäktiga sand- och grusavlagringar både som fönster och underlagrande finkorniga jordarter, men även begravda dalar eller möjliga sprickzoner i berggrunden (område 1-3).

Kombinationen av dessa tre geologiska miljöer i ett relativt litet område gör området mycket intressant ur vattenförsörjningssyfte.

SGUs borrning (BMW181103) utfördes i ett område där resistivitetsdata tolkades som fönster i mäktig lera och jordlager på 40-50m. Lagerföljden visade dock på mestadels finmaterial och troligen berg redan vid 20m djup. Avslut i vad som tolkades som morän kan vara förklaring då ett eventuellt block i morän stoppar vidare borrning

Det finns dock flera borrningar (t.ex. 909134959) i området som stödjer tolkningarna att det finns sand- och grusavlagringar såväl i ytan som under lera.

brunnsarkivet





FURALA

Furala ligger nordost om Laholm. Området består till stora delar av en höjd, och enligt jordartskartan och en borrning (997044839), bestående av isälvsavlagringar utan underliggande lerlager. Resistiviteten är konstant hög vilket tolkas som torr sand och grus från yta till berg. I områden med så hög resistivitet i jordlagren är bedömning av bergets överyta svår.

Området skulle kunna vara intressant då det finns ytvatten i närheten och de tolkade torra sand och grusavlagringarna tjänstgöra som infiltrationsområde. SGUs borrning (BMW181102) visar dock på morän, vilket inte lämpar sig för infiltration.

Slutsatsen är att det finns stora lokala variationer i området. Troligen är det endast delar av området som består av isälvsmaterial. Moränen var torr enligt SGUs borrning och visar sig ha mycket höga resistiviteter. Detta är en viktig lärdom att ta med till andra platser med liknande resistivitetsmönster.

ATEM - datapunkt

profil

- brunnsarkivet
- parameterdatabas

jordlagerföljder





100

200

300

400

500

600

700

800

900

1 000

1 100

1 200

Området ligger strax öster om Laholm i närheten av Lagan. Tolkningar av resistivitetsdata indikerar på ett antal möjliga sprickzoner i berggrunden, tex. 1400-1800m i profil A-A' samt 500 & 900m i profil B-B', som kan vara intressanta. Det finns även områden med mäktiga sand- och grusavlagringar både som fönster, jämför 0-200m i profil A-A' och som underlagrar finkorniga jordarter, jämför med borrningar vid 400-500m i profil A-A'.

Kombinationen av dessa tre geologiska miljöer och stor tillgång till ytvatten ifrån Lagan gör detta område till ett av de intressantaste. Det finns flera borrningar i området som stödjer tolkningarna att det finns sand- och grusav-

SGU utförde en borrning söder om Lagan (BMW181106). Enligt lagerföljden är det sand och grus följt av lera och sedan rösberg.

Öster om det utpekade området finns ett högresistivt område som kan utgöra ett möjligt

ATEM - datapunkt

BMW181106

profil

Α'

2 200







LAHOLM SO

Området ligger precis sydsydväst om Laholm och söder om Lagan. Tolkning av resistivitetsdata ger en generell jordlagerföljd inom området som består av 15-25m mäktiga sand- och grusavlagringar som överlagrar lera och silt med mäktigheter på 10-40m.

Under dessa täta jordarter finns det indikationer på dalgångar och sprickzoner, tex vid 400, 1600, 2000 3600 och 4000m i profilen, som ibland kan vara fyllda av sand- och grusavlagringar enligt något enstaka brunnsprotokoll.

De mäktiga sand- och grusavlagringarna i ytan kan dels utgöra infiltrationsområden men även utgöra akviferer. Den eventuella akviferen i dalgångar och sprickzoner behöver borrningar för att bekräftas och bättre avgränsas.

Tillgång till ytvatten från Lagan gör detta område ytterligare intressant.

ATEM - datapunkt

- brunnsarkivet
- parameterdatabas







EDENBERGA

Området ligger centralt i de östra delarna av undersökningsområdet. Längst i öster indikerar resistivitetsdata på företrädesvis sand- och grusavlagringar med en mäktighet på 30-40m. Området utgör troligen ett viktigt infiltrationsområde för laholmsslätten men lokalt bör det även finnas möjlighet till vattenuttag. Delar av de östra områdena saknar mäktigt lerlager trots att det visas så i jordartskartan.

Västerut kommer det in en kil med lera, se tex. 600-1500m i profil B-B', under ytligt liggande sand och grus. Det finns tecken i resistivitetsdata på att det finns sand och grus även under leran. Det finns även lagerföljdsdata från borrningar i området som stödjer tolkningarna.

I skogsområdet, öster om Edenberga (0-600m, profil A-A´) finns ett område med hög resistivitet och lagerföljder som visar på sand- och grusavlagring med stor mäktighet och lämpligt för infiltration.

Det finns även indikationer i resistivitetsdata på begravda dalar där det kan finnas vattenmättade sand- och grusavlagringar (tex. 500-600m, profil C-C'). Dessa områden kan även indikera svaghetszoner i berggrunden. Inom området Edenberga finns flera intressanta möjliga uttagsområde.

ATEM - datapunkt

- brunnsarkivet
- parameterdatabas







RÄNNESLÖV JORD

Området ligger strax söder om Ränneslöv. Enligt både jordartskartan och resistivitetsdata finns det sand och grusavlagringar i ytan. Den isälvsavlagring som syns i jordartskartan är troligen mäktig och kan utgöra ett fönster. Det är möjligt att man i resistivitetsdata kan se skillnad mellan mättad och omättad sand och att grundvattenytan ligger på ca 10m.ö.h.

Det tolkade jorddjupet är cirka 25m men det kan vara mer då det kan finnas jord i en svacka i berggrunden. En annan förklaring till den lågresistiva zonen är att det finns en svaghetszon i berggrunden som kan vara vattenförande ned till ca -50 m ö.h.

SGU utförde två borrningar i området. Den ena (BMW181108) visar en lagerföljd med fin till grov sand följt av silt och finsand och därunder sand och grus. Den andra (BMW181109) visar på sand och grus de översta 10m och därefter lera. Båda borrningarna avslutades mot block eller berg.

Mot söder och öster finns inslag av tydlig lågresistiv lera i lagerföljden, men även indikationer på underlagrande sand och grus.

Inom området finns troligen både möjliga infiltrations- och uttagsområde.









HASSLÖV

Området Hasslöv ligger i södra delen av undersökningsområdet med Hallandsås som avgränsning söderut. Inom området finns en befintlig kommunal vattentäkt.

Den generella jordlagerföljden enligt resistivitetsdata är 15-20m mäktiga sand- och grusavlagringar överlagrande lera och silt med mäktigheter på 10-40m.

Strax väster om Hasslöv finns sand och grus under lera i ett större område. Borrningar vid Dömestorp, Hasslövs prästgård och Torp visar på att det finns en undre akvifer även här.

Resistivitetsdata pekar på att det inom området finns möjliga fönster med sand och grus från ytan ner till berget (tex. 4000-4200m i profilen), bl.a. vid Bondåkra och Hasslöv. I dessa områden sker troligen mycket av nybildningen till den undre akviferen.

Närheten till ytvatten i form av Stensån gör området ytterligare intressant då man har tillgång till infiltrationsvatten.









VINDRARP

Området ligger i södra delen av undersökningsområdet nära Hallandsås och uppvisar ett heterogent resistivitetsmönster som är svårtolkat. De östra delarna har en högre resistivitet vilket stämmer överens med jordartskartans isälvsmaterial (tex. 1900-2100m i profil B-B'). Här finns troligen 25m mäktiga sand- och grusavlagringar utan någon underlagrande mäktig lera. Området kan utgöra ett viktigt infiltrationsområde.

SGU utförde en borrning (BMW181105) i jordlagren som visar på finkorniga jordarter och lera och avslutningsvis morän ovanpå berget eller ett block i moränen vilket inte är entydigt med tolkning av resistivitetsdata.

I resistivitetsdata finns det en övergångszon mellan lågresistiva jordlager och en högresistiv berggrund (se 0-1700m i profil A-A´) som i analogi med området Hasslöv kan utgöra underliggande sand och grusavlagringar.

Områden med resistivitetsskillnader i berggrunden kan tolkas som lågresistiva zoner med sprucket vattenfyllt, eventuellt lervittrat berg respektive högresistiv opåverkad berggrund (1300-2900m, profil A-A').

Inom området utfördes tTEM undersökningar, se bilaga 3 för resultat.



BILAGA 2. INTRESSANTA OMRÅDEN I FALKENBERG



Områda	Geologisk miljö	Redovisas	Geologiska miljöer		
Officaue			1	Sand- och grusavlagringar med stor mäktighet	
Rävige	2	bilaga 2	2	Sand- och grusavlagringar som underlagrar	
Höstena	1,2,3	huvudrapport		finkorniga och täta jordarter med stor mäktighet	
Bergagård	1,2	bilaga 2	3	Sprickzoner i urberg	
Kärreberg Södra	2	bilaga 2			
Glostorp-Vessige	1,2	huvudrapport			
Vinberg	2	bilaga 2			
Veneberg – Sörby	1, 2	bilaga 2			
Heberg	2	huvudrapport			
Boberg	1,2,3	bilaga2			
	Område Rävige Höstena Bergagård Kärreberg Södra Glostorp-Vessige Vinberg Veneberg – Sörby Heberg Boberg	OmrådeGeologisk miljöRävige2Höstena1,2,3Bergagård1,2Kärreberg Södra2Glostorp-Vessige1,2Vinberg2Veneberg-Sörby1,2Heberg2Boberg1,2,3	OmrådeGeologisk miljöRedovisasRävige2bilaga 2Höstena1,2,3huvudrapportBergagård1,2bilaga 2Kärreberg Södra2bilaga 2Glostorp-Vessige1,2huvudrapportVinberg2bilaga 2Veneberg-Sörby1,2bilaga 2Heberg2huvudrapportBoberg1,2,3bilaga 2	OmrådeGeologisk miljöRedovisas1Rävige2bilaga 22Höstena1,2,3huvudrapport3Bergagård1,2bilaga 23Kärreberg Södra2bilaga 24Glostorp-Vessige1,2huvudrapportVinberg2bilaga 2Veneberg – Sörby1,2bilaga 2Heberg2huvudrapportBoberg1,2,3bilaga 2	









Α

Α'

Köind

unnagård

500

Okome



Området Rävige ligger i nordligaste delen och i utkanten av undersökningsområdet. Stockån har eroderat ner kraftigt i jordlagren och skapat en dalgång centralt i området.

Tolkning av resistivitetsdata pekar på en typisk jordlagerföljd med torr sand eller finmaterial i ytan, därunder ett relativt mäktigt lerlager på 10-15m som ställvis underlagras av sand- och grusavlagringar (se t.ex. 0-600m i profil A-A'). En borrning som utfördes av SGU (BMW175903) verifierar den tolkade lagerföljden.

En geologisk tolkning är att det är deltaavlagring som ligger öster om Rävige vid Okome samhälle som fortsätter, om än med mindre mäktighet, mot sydväst och överlagras av lera och därefter svallsand. Isälvsavlagringen vid Okome utgör troligt nybildningsområde för grundvattenmagasinet.

Område innanför röd polygon i plankartan visar var resistivitetsdata indikerar störst mäktighet av sand- och grusavlagringar på djupet. I detta område torde det finnas möjligheter för grundvattenuttag.





- Vattenskyddsområde
- Gräns för
- Lagerföljder med minst 5 m sand/grus under lera
- grus oavsett omgivade lager
- Övriga lagerföljder
- ATEM datapunkt

Liunaby

BERGAGÅRD

I Vinåns dalgång finns området Bergagård. På östra sidan av dalgången, i närheten av Lilla Ljungby, finns jordlager uppemot 30m som till Lagerföljder med minst 10 m största delen består av sand. I samma höjd på västra sidan finns även mäktiga jordlager men dessa är mer troligt varvade avlagringar med hydrauliskt tätare finsediment. I området finns ett vattenskyddsområde.

> Cirka 500 m norr om Töllstorp finns ett högresistivt område (1000-1250m i profilen). Tolkningen är att det är relativt torra jordlager, troligen rör sig om sand- och grusavlagringar. Området kan utgöra ett viktigt lokalt nybildningsområde. Det finns dock områden med liknande resistivitet som visat sig vara morän. Det sker troligen även nybildning från höjdområdena väster och öster om det utpekade området samt norrifrån i Vinåns dalgång.

> Det finns ett antal brunnar i området som visar sand- och grusavlagringar under lera (se brunnar i profilen). Tolkning av resistivitetsdata pekar mot att detta grundvattenförande sand- och gruslager finns i stora delar av området. Enligt tidigare översiktlig kartering finns ett grundvattenmagasin med god uttagskapacitet som sträcker sig i dalgångens riktning.

> Vinån som rinner genom området kan bidra med vatten till magasinet. Med jordborrningar, temperaturmätningar, kemisk vattenanalys och provpumpningar kan man få en bild av kontaktmöjligheter mellan Vinån och grundvattenmagasinet.





- Potentiellt undre magasin
- Gräns för delavriningsområde
- delaviiningsonnade
- Lagerföljder med minst 5 m sand/grus under lera
- Lagerföljder med minst 10 m
- grus oavsett omgivade lager
- Övriga lagerföljder
- ATEM datapunkt





KÄRREBERGA - SÖDRA

Området ligger centralt i undersökningsområdet med Ätran åt sydost. I norra delen (t.ex. 1200-2200m i profil A-A') indikerar resistivitetsdata på potentiellt grövre material medan borrningar visar mest morän. Detta är ställvis överlagrat av lågresistivt finmaterial. Söderut saknas borrningar men resistivitetsdata är densamma. Det är osäkert om det är sand eller morän och det krävs borrningar för att identifiera möjliga områden för infiltration och grundvattenuttag.

Strax väster om Ätran, vid Vattsgård och Dalsgård, syns en trolig sand- och grusavlagring som överlagras av lågresistivt material (se profil B-B'). Troligtvis finns ett sluttande plan åt sydväst med vattenförande sand och grus under finmaterial. I södra delen av området finns två brunnar, en bergborrad (911045987) och en i jordlagren (902010453). Båda brunnarna verifierar tolkning av lagerföljden inom området. Brunnen i jordlager har bättre kapacitet än den bergborrade, troligen för att den bergborrade brunnen skärmat av grundvatten från jordlagren med foderrör.

Sannolikt finns ett undre magasin i den sydöstra delen, se transparent blå markering. Dock finns det en risk att den naturliga grundvattenbildningen till området är otillräcklig för större grundvattenuttag då området ligger högt upp i delavrinningsområdet. Kan man finna områden mellan Kärreberga och Dalsgård där man kan anlägga infiltrationsdammar uppströms det undre magasinet skulle området dock kunna vara intressant för vattenförsörjning





- Vattenskyddsområde
 - 📑 Gräns för delavriningsområde
- Lagerföljder med minst 5 m sand/grus under lera
- Lagerföljder med minst 10 m grus oavsett omgivade lager
- Övriga lagerföljder
- ATEM datapunkt





VINBERG

Vinberg ligger i de östra delarna av undersökningsområdet, öster om Töringe. I området finns en vattentäkt och vattenskyddsområde. Genom området rinner Vinån.

Data indikerar relativt högresistiva sand- och grusavlagringar under lågresistiv lera (syns som tydligast 1500-1700m i profil B-B') inom stora delar av området. Troligen är den undre akviferen omkring 5-10 m mäktig. Lagerföljder från flera brunnar verifierar tolkningen med underlagrande sand och grus (se profiler).

Den geologiska tolkningen är att de lerlager som syns i jordrtskartan inom och i närheten av området är av varierande mäktighet och att de deltaavlagringar som syns i jordartskartan finns även under den mäktiga leran.

Närheten till ytvatten i form av Vinån gör området intressant ur infiltrationssynpunkt. Dock har vi i resistivitetsdata inte kunnat urskilja något säkert fönster lämpligt för infiltration, ett möjligt område syns i profil B-B´vid 450-550m.

Det är svårt att urskilja en sammanhängnade sandavlagring längs med dalgången från resistivitetsdata. Det verkar mer vara frågan om mindre områden med bättre förhållanden med avbrott av finkornigare sediment mellan. Det är dock inte omöjligt att kontakt finns mellan vissa av dessa områden och olika nivåer. Dominerande jordarter i dalgången är dock finsand-silt och lera.





- Wattenskyddsområde
 - Lagerföljder med minst 5 m sand/grus under lera
 - Lagerföljder med minst 10 m grus oavsett omgivade lager
 - Övriga lagerföljder
 - ATEM datapunkt

100200

N/175904

km

VENEBERG - SÖRBY

Området ligger centralt i undersökningsområdet och öster om Ätran. I området finns en vattentäkt och ett vattenskyddsområde. Genom området rinner Sannarpsån.

Tolkning av resistivitetsdata indikerar att den generella jordlagerföljden består av ytligt liggande sand- och grusavlagringar på 5-10m, som underlagras av uppemot 20 m mäktig lera eller silt. I norra delen av området (se 2200-2700m i profil A-A') finns troligen även fönster där sand- och grusavlagringar går i dagen och har stor mäktighet (20m).

Brunnar inom området stödjer tolkning av lagerföljderna beskrivna ovan (profil B-B'). Den geologiska tolkningen är att deltaavlagringarna i södra delen av området även finns under den mäktiga leran och hänger ihop med deltaavlagringarna mot nordost.

Området med isälvsavlagringar i ytan är intressant för konstgjord infiltration medan uttag ur det undre magasinet kan göras längre söder ut (t.ex. mellan 600-1500m i profil B-B').



Norre

Sörby

nnarpsån

Sannarp

km

eneberg



BOBERG

Boberg ligger i södra delen av undersökningsområdet. Suseån rinner genom området. Det finns flera intressanta områden med olika geologiska miljöer på korta avstånd här.

Vid jämförelse mellan profiler (se nedan) genom de två områdena öster och väster om Suseån syns en återkommande struktur i nordväst – sydostlig riktning. Detta har tolkats som en dalgång delvis fylld med grus och sand vilket vore ett bra område för grundvattenuttag. Strukturen behöver verifieras med djupborrningar.

Öster om Suseån (se t.ex. profil C-C´) finns sannolikt ett sluttande plan mot sydväst med sand- och grusavlagringar som kan utgöra en akvifer under lera.

Det finns brunnar (t.ex. TOL501143) inom området som anger varviga lager med finmaterial och sand/grus. De ligger inte i närheten av någon datapunkt men lagerföljden bekräftar tydligt den tolkade lagerföljden. Det är troligast störst mäktighet på underliggande sand och grus väster om Suseån.

I det norra delområdet finns såväl indikationer i resistivitetsdata som brunnar som visar på sandoch grusavlagringar under lera (t.ex. 1500m i profil A-A')


BILAGA 3. REDOVISNING AV TTEM RESULTAT

Bilaga 3 består av två appendix (II och III) som ingår i den datarapport över de tTEM mätningar som utfördes, av Hydro Geophysics Group från Aarhus Universitet, i Laholmsområdet. Rapporten är tillgänglig i sin helhet via SGU, referera till Rapport: tTEM Mapping Yllevald, Sweden, diarienummer 312-2430/2018.



APPENDIX II: CROSS SECTIONS

Selected cross sections for the smooth inversion are included. Each section holds the model bars blanked at the DOI- standard value. Sections for all the mapping lines are available in the delivered Workspace. A SkyTEM survey has also been carried out in the area, and the corresponding SkyTEM models in a search radius of 15 m from the profile has been added as model bars with a black border on the cross sections.









APPENDIX III: MEAN RESISTIVITY MAPS

This appendix includes mean resistivity maps generated from the smooth model inversion result in 5 m depth intervals from 0 to 30 m, and in 10 m intervals from 30 to 70 m. The resistivity models have been blanked at the DOI standard value prior to the interpolation to regular mean resistivity grids.

The interpolation of the mean resistivity values is performed by kriging interpolation, with a node spacing of 5 m, a search radius of 50 m, and with additional pixel smoothing.











10.0







10.0



450 m

























Uppsala 2018 ISSN 0349-2176 ISBN 978-91-7403-460-8

Geological Survey of Sweden Box 670 SE-751 28 Uppsala Phone: +46 18 17 90 00 Fax: +46 18 17 92 10 www.sgu.se